

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

**Μεταπτυχιακή Εργασία**

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΣΤΗ ΜΕΤΑΠΤΩΣΗ  
ΣΕ ΔΙΑΛΕΠΟΥΣΑ ΡΟΗ ΣΕ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ-ΑΕΡΙΟΥ**

υπό

**Κωνσταντίνος Σορανίδου**

**Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Π.Θ., 2007**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

**Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης**

**Βόλος, Μάρτιος 2009**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 7058/1  
Ημερ. Εισ.: 03-04-2009  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: Δ  
620.106 4  
ΣΥΡ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΣΤΗ ΜΕΤΑΠΤΩΣΗ  
ΣΕ ΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑ ΡΟΗ ΣΕ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ-ΑΕΡΙΟΥ**

υπό

**Κωνσταντίνος Συρανίδου**

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Π.Θ., 2007

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης

Βόλος, Μάρτιος 2009

© 2009 Κωνσταντίνα Συρανίδου

Η έγκριση της μεταπτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου  
Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως  
(Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

## Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Πενταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος Αναπληρωτής Καθηγητής Πειραματικών Φαινομένων Μεταφοράς, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Μιχαήλ Βλαχογιάννης Αναπληρωτής Καθηγητής Μηχανικής Ρευστών και Υδροδυναμικών Μηχανών, Τμήμα Μηχανολογίας, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Λάρισας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου Καθηγητής Φαινομένων Μεταφοράς - Συσκευών Φυσικών Διεργασιών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τέταρτος Εξεταστής	Δρ. Κωνσταντίνος Παπαδημητρίου Καθηγητής Δυναμικής των Κατασκευών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πέμπτος Εξεταστής	Δρ. Αναστάσιος Σταμάτης Επίκουρος Καθηγητής Εφαρμοσμένης Δυναμικής - Θερμικών Σταθμών, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ν. Ανδρίτσο, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου.

Συγχρόνως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Μ. Βλαχογιάννη για την πολύτιμη βοήθεια, προσφορά και συνεργασία του.

Είμαι επίσης ευγνώμων στον Καθηγητή κ. Β. Μποντόζογλου, στον Καθηγητή κ. Κ. Παπαδημητρίου και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Αν. Σταμάτη για την ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους.

Επιπρόσθετα, θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Ν. Χολέβα για την καθοριστική παρέμβασή του σε μία κρίσιμη στιγμή της διεξαγωγής των πειραμάτων μου.

Χίλια ευχαριστώ στη Χριστίνα και το Βλάσση για την πραγματικά ανεκτίμητη και συνεχή βοήθειά τους σε όλα τα προβλήματα που αντιμετώπισα κατά την πορεία της εργασίας μου.

Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τους φίλους μου Βαγγελιώ και Σταύρο για τη συνεχή συμπαράσταση και βοήθεια καθώς και τους φίλους μου Θωμά και Φωτεινή για την (έστω και τηλεφωνική) ψυχική υποστήριξη.

Επιπλέον, θέλω να πω ένα ευχαριστώ στην αδερφή μου Βάσω για τη συμπαράστασή της σε κάθε δύσκολη στιγμή της ζωής μου αλλά και γιατί κάθε μέρα που περνάει με κάνει όλο και πιο περήφανη.

Θέλω επίσης να πω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ μέσα από την καρδιά μου στον Παναγιώτη για την απίστευτη κατανόηση και την ουσιαστική συμπαράσταση και βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την αγάπη και την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, Ζωή και Ευγένιο Συρανίδη, για την αγάπη και την συνεχή, άνευ όρων υποστήριξη (κάθε μορφής) που μου προσέφεραν. Το λιγότερο που μπορώ να κάνω είναι να τους αφιερώσω την εργασία αυτή.

*Νάντια.*

# ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΑΓΩΓΟΥ ΣΤΗ ΜΕΤΑΠΤΩΣΗ ΣΕ ΔΙΑΛΕΙΠΟΥΣΑ ΡΟΗ ΣΕ ΔΙΦΑΣΙΚΗ ΡΟΗ ΥΓΡΟΥ-ΑΕΡΙΟΥ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑ ΣΥΡΑΝΙΔΟΥ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας,  
2009

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος, Αναπληρωτής Καθηγητής  
Πειραματικών Φαινομένων Μεταφοράς

## Περίληψη

Η διφασική ροή υγρού - αερίου, η ταυτόχρονη δηλαδή ροή δύο φάσεων ενός ή περισσότερων ρευστών σε οριζόντιους ή σχεδόν οριζόντιους αγωγούς, χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές (όπως συμπυκνωτές, εξατμιστήρες, μεταφορά πετρελαίου, φυσικού αερίου και γεωθερμικών ρευστών). Η πρόβλεψη του καθεστώτος της διαλείπουσας ροής (slug flow) που παρατηρείται κατά τη διφασική ροή είναι μείζονος βιομηχανικής σημασίας καθώς χαρακτηρίζεται από απότομες αυξήσεις της πίεσης, γεγονός ανεπιθύμητο στις περισσότερες εφαρμογές.

Τα τελευταία 50 χρόνια έχει πραγματοποιηθεί εκτενής μελέτη της διφασικής ροής σε αγωγό, ωστόσο περιορίζεται κυρίως στο σύστημα ροής νερού - αέρα σε οριζόντιους ή κατακόρυφους αγωγούς. Ελάχιστες είναι οι εργασίες που διερευνούν τη διφασική ροή σε κεκλιμένους αγωγούς ή την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών στις διάφορες μεταπτώσεις.

Σε αυτήν την μεταπτυχιακή εργασία γίνεται μία προσπάθεια πειραματικής μελέτης της επίδρασης της κλίσης του αγωγού στους χάρτες των καθεστώτων ροής καθώς και των φυσικών ιδιοτήτων της υγρής φάσης κατά τη

μετάπτωση από διαλείπουσα ροή σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα σε ανηφορική ροή.

Αρχικά γίνεται μία συγκεντρωτική αναφορά σε παλαιότερες μελέτες και συγκρίνονται τα αναφερόμενα αποτελέσματα και συμπεράσματα. Στην συνέχεια δίνεται μία περιγραφή της πειραματικής διάταξης και διαδικασίας. Ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και η προσπάθεια για την εξήγηση αυτών. Τέλος, συνοψίζονται τα συναγόμενα συμπεράσματα και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ανηφορική κλίση του αγωγού ευνοεί την εμφάνιση του καθεστώτος διαλείπουσας ροής εις βάρος της διαστρωματωμένης. Τέλος, η αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης έχει σταθεροποιητική επίδραση στη διαστρωματωμένη ροή με κύματα, όπως και η μείωση της επιφανειακής τάσης της υγρής φάσης, ωστόσο ευνοούν την ανάπτυξη διαλείπουσας ροής σε μεγαλύτερο εύρος παροχών αέριας φάσης.



## Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1	Κίνητρο και Υπόβαθρο .....	1
1.2	Οργάνωση Μεταπτυχιακής Εργασίας.....	3
Κεφάλαιο 2	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	4
2.1	Καθεστώτα ροής.....	4
2.2	Επίδραση του ιξώδους.....	12
2.3	Επίδραση της κλίσης του αγωγού.....	16
2.4	Χάρτες καθεστώτων ροής και όρια μεταπτώσεων .....	24
Κεφάλαιο 3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	34
Κεφάλαιο 4	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	41
4.1	Γενικά .....	41
4.2	Χάρτες καθεστώτων ροής.....	50
4.3	Επίδραση της κλίσης του αγωγού.....	56
4.4	Επίδραση του ιξώδους της υγρής φάσης.....	60
4.5	Επίδραση της επιφανειακής τάσης της υγρής φάσης.....	63
Κεφάλαιο 5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ .....	66
5.1	Συμπεράσματα.....	66
5.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	67
Βιβλιογραφία .....		69
Παράρτημα .....		73

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1 Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε κατακόρυφο αγωγό για ροή προς τα επάνω.....	5
Σχήμα 2-2 Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό.....	8
Σχήμα 2-3 Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό σε συνθήκες απουσίας βαρότητας (Jayawardena et al, 1997).....	11
Σχήμα 2-4 Χάρτης καθεστώτων ροής (Andreussi & Persen, 1987).....	18
Σχήμα 2-5 Χάρτης καθεστώτων ροής σύμφωνα με τον Baker (1954).....	25
Σχήμα 2-6 Χάρτης καθεστώτων ροής όπως προτάθηκε από τους Mandhane et al. (1974).....	28
Σχήμα 3-1 Σχηματικό Διάγραμμα της Πειραματικής διάταξη.....	35
Σχήμα 3-2 Μετρητικό στοιχείο ζεύγους παράλληλων συρμάτων και η σύνδεση με τον αναλυτή σήματος.....	39
Σχήμα 4-1 Φωτογραφική απεικόνιση ενός «slug» ( $u_{LS}=0,00041$ m/s, $u_{CS}=1,7$ m/s, $\mu_L=46$ cP).44	44
Σχήμα 4-2 Αποτόπωμα ενός «slug» ( $u_{LS}=0,00041$ m/s, $u_{CS}=1,7$ m/s, $\mu_L=46$ cP). .....	44
Σχήμα 4-3 Αποτόπωμα διαλείπουσας ροής για ιξώδες της υγρής φάσης 46 cP .....	45
Σχήμα 4-4 Αποτόπωμα διαλείπουσας ροής για ιξώδες της υγρής φάσης 14 cP .....	45
Σχήμα 4-5 Αποτόπωμα διαλείπουσας ροής για ιξώδες της υγρής φάσης 1 cP .....	45
Σχήμα 4-6 Φωτογραφική απεικόνιση κυμάτων 2D για ιξώδες της υγρής φάσης 46 cP .....	48
Σχήμα 4-7 Αποτόπωμα κυμάτων 2D για ιξώδες της υγρής φάσης 46 cP .....	48
Σχήμα 4-8 Αποτόπωμα κυμάτων 2D για ιξώδες της υγρής φάσης 14 cP .....	48
Σχήμα 4-9 Αποτόπωμα κυμάτων 2D για ιξώδες της υγρής φάσης 1 cP .....	48
Σχήμα 4-10 Φωτογραφική απεικόνιση κυμάτων K – H για ιξώδες της υγρής φάσης 46 cP.....	49
Σχήμα 4-11 Αποτόπωμα κυμάτων K – H για ιξώδες της υγρής φάσης 46 cP .....	49

Σχήμα 4-12 Αποτόπωμα κομάτων K – H για ιξώδες της υγρής φάσης 14 cP .....	49
Σχήμα 4-13 Αποτόπωμα κομάτων K – H για ιξώδες της υγρής φάσης 1 cP .....	49
Σχήμα 4-14 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού – αέρα και ανηφορική ροή με κλίση - 0,55° .....	51
Σχήμα 4-15 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού – αέρα και ανηφορική ροή με κλίση – 1,00° .....	51
Σχήμα 4-16 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού – βουτανόλης – αέρα και ανηφορική ροή με κλίση - 0,55° .....	52
Σχήμα 4-17 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού – βουτανόλης – αέρα και ανηφορική ροή με κλίση – 1,00° .....	52
Σχήμα 4-18 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα διαλύματος γλυκερίνης (ιξώδους 14 cP) – αέρα και ανηφορική ροή με κλίση –0,55° .....	54
Σχήμα 4-19 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα διαλύματος γλυκερίνης (ιξώδους 14 cP) – αέρα και ανηφορική ροή με κλίση –1,00° .....	54
Σχήμα 4-20 Χάρτης καθεστώτων για το σύστημα διαλύματος γλυκερίνης (ιξώδους 46 cP) – αέρα και ανηφορική ροή με κλίση –0,55° .....	55
Σχήμα 4-21 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα διαλύματος γλυκερίνης (ιξώδους 46 cP) – αέρα και ανηφορική ροή με κλίση –1,00° .....	55
Σχήμα 4-22 Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κόμματα για δύο γωνίες κλίσης για το σύστημα με ιξώδες υγρής φάσης 1 cP .....	56
Σχήμα 4-23 Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κόμματα για δύο γωνίες κλίσης στο σύστημα νερό - βουτανόλη - αέρας .....	57

<b>Σχήμα 4-24</b> Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κόματα για δύο γωνίες κλίσης για το σύστημα με ιξώδες υγρής φάσης 14 cP. ....	58
<b>Σχήμα 4-25</b> Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κόματα για δύο γωνίες κλίσης για το σύστημα με ιξώδες υγρής φάσης 46 cP. ....	59
<b>Σχήμα 4-26</b> Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και μετάπτωσης ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κόματα για συστήματα με ιξώδες 1 cP (νερό - αέρας), 14 cP (γλυκερίνη 60% κ.ο. - αέρας) και 46 cP (γλυκερίνη 74% κ.ο. - αέρας) για ανηφορική ροή με κλίση $-0,55^\circ$ . ....	61
<b>Σχήμα 4-27</b> Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κόματα για συστήματα με ιξώδες 1 cP (νερό - αέρας), 14 cP (γλυκερίνη 60% κ.ο. - αέρας) και 46 cP (γλυκερίνη 74% κ.ο. - αέρας) για ανηφορική ροή με κλίση $-1,00^\circ$ . ....	62
<b>Σχήμα 4-28</b> Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και μετάπτωσης ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κόματα για το σύστημα νερό - αέρας και υδατικό διάλυμα βουτανόλης - αέρας σε ανηφορική ροή με κλίση $-0,55^\circ$ . ....	63
<b>Σχήμα 4-29</b> Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και μετάπτωσης ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κόματα για το σύστημα νερό - αέρας και υδατικό διάλυμα βουτανόλης - αέρας σε ανηφορική ροή με κλίση $-1,00^\circ$ . ....	64

## Κατάλογος Συμβόλων

### Λατινικοί Χαρακτήρες

- C : ηλεκτρική αγωγιμότητα (S)
- D : διάμετρος αγωγού (m)
- d : διάμετρος συρμάτων (m)
- $D_0$  : απόσταση μεταξύ συρμάτων (m)
- G,L : μαζική ταχύτητα αέριας και υγρής φάσης αντίστοιχα
- h : ύψος υγρής φάσης στον αγωγό (m)
- Re : αριθμός Reynolds
- S : περίμετρος (m)
- u : μέση ταχύτητα (m/s)
- $u_s$  : φαινομενική ταχύτητα (m/s)

### Ελληνικοί Χαρακτήρες

- $\gamma$  : ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (S/m)
- $\varphi$  : γωνία κλίσης του αγωγού (rad)
- $\lambda$  : διορθωτικός παράγοντας στο χάρτη Baker
- $\mu$  : δυναμικό ιξώδες (Pa·s)
- $\nu$  : κινηματικό ιξώδες ( $m^2/s$ )
- $\rho$  : πυκνότητα ( $kg/m^3$ )
- $\sigma$  : επιφανειακή τάση (N/m)
- $\tau$  : διατμητική τάση ( $N/m^2$ )
- $\psi$  : διορθωτικός παράγοντας στο χάρτη Baker

### Δείκτες:

- G : αέρια φάση
- L : υγρή φάση

## Κεφάλαιο 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Φυσικών και Χημικών Διεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Στόχος της είναι η πειραματική μελέτη της διφασικής ροής υγρού – αερίου σε κεκλιμένο αγωγό. Συγκεκριμένα, διερευνάται πώς επηρεάζουν οι φυσικές ιδιότητες του υγρού αλλά και η κλίση του αγωγού την μετάπτωση στα διάφορα καθεστώτα ροής που επικρατούν στο εσωτερικό του αγωγού.

### 1.1 Κινητρο και Υπόβαθρο

Η διφασική ροή, δηλαδή η ταυτόχρονη ροή δύο φάσεων μέσα σε έναν αγωγό, αποτελεί μία από τις συνηθέστερες μορφές ροής που απαντώνται στη βιομηχανία, ενώ ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην μελέτη της ροής υγρού – αερίου εξ' αιτίας των πολλών εφαρμογών της. Οι διεργασίες συμπύκνωσης και εξάτμισης, η απορρόφηση και η απόσταξη, όπως επίσης και η μεταφορά πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι κάποιες από τις βασικές εφαρμογές της διφασικής ροής στη βιομηχανία.

Ένα σημαντικό στοιχείο που βοηθά στην κατανόηση της ροής και την

πρόβλεψη των χαρακτηριστικών της διφασικής ροής υγρού – αερίου μέσα σε

έναν αγωγό είναι ο καθορισμός των καθεστώτων ροής που εμφανίζονται στη ροή. Με την έννοια καθεστώσ ροής (flow regime ή flow pattern) νοείται το γεωμετρικό σχήμα που έχει η διεπιφάνεια μεταξύ του αερίου και του υγρού κατά τη ροή μέσα σε αγωγό. Είναι αρκετές οι παράμετροι που καθορίζουν ποιο καθεστώς ροής θα σχηματιστεί: οι συνθήκες παροχής, πίεσης και μεταφοράς θερμότητας που επικρατούν κατά τη ροή, οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών (όπως η πυκνότητα και το ιξώδες των δύο φάσεων) καθώς και η γεωμετρία του αγωγού, δηλαδή η μορφή της διατομής, η κλίση, η ισοδύναμη διάμετρος και η τραχύτητα του αγωγού.

Το πιο συνηθισμένο σύστημα που χρησιμοποιείται κατά τις πειραματικές μελέτες είναι το σύστημα αέρα - νερού και τα περισσότερα διαγράμματα καθεστώτων ροής που υπάρχουν στη βιβλιογραφία αναπαριστούν καθεστώτα κατά τη ροή σε οριζόντιους ή κατακόρυφους αγωγούς. Λίγες σχετικά είναι οι εργασίες αυτές που επικεντρώνονται στη μελέτη διφασικής ροής σε κεκλιμένους αγωγούς και ακόμα λιγότερες αυτές που μελετούν την επίδραση των φυσικών ιδιοτήτων των ρευστών. Η σημασία τους ωστόσο είναι καθοριστική για τον σχεδιασμό ενός αγωγού, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις βιομηχανικών εφαρμογών συναντώνται αγωγοί με απόκλιση από το οριζόντιο επίπεδο, έστω και μικρή.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των φυσικών ιδιοτήτων της υγρής φάσης κατά την μετάπτωση από τη διαλείπουσα ροή (intermittent: «slug», «plug» ή «pseudo-slug») σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα σε αγωγό με διάμετρο 0,024 m και μήκος 12,75 m. Τα υγρά που

χρησιμοποιήθηκαν ως υγρή φάση είναι νερό, υδατικό διάλυμα βουτανόλης και διαλύματα νερού – γλυκερίνης. Τέλος, μελετάται και η επίδραση της μεταβολής της κλίσης του αγωγού στα διαγράμματα των καθεστώτων ροής για ροή με κλίση προς τα επάνω. Οι κλίσεις που μελετήθηκαν είναι  $-0,55^\circ$  και  $-1,00^\circ$ .

## 1.2 Οργάνωση Μεταπτυχιακής Εργασίας

Στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται σχετική βιβλιογραφική ανασκόπηση και γίνεται συγκριτική παράθεση προγενέστερων δημοσιεύσεων. Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η πειραματική διάταξη και η διαδικασία των πειραματικών μετρήσεων. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας καθώς και σχολιασμός αυτών. Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από την παρούσα εργασία και γίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα. Τέλος, δίνεται ο πίνακας της χρησιμοποιούμενης βιβλιογραφίας για τη συγγραφή της παρούσας εργασίας.



## Κεφάλαιο 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Υπάρχει μεγάλο πλήθος ορισμών των καθεστώτων ροής που έχουν δοθεί από διάφορους ερευνητές αλλά οι περισσότεροι περιορίζονται στη μελέτη της ροής σε κατακόρυφους ή οριζόντιους αγωγούς. Στην πράξη ωστόσο οι περιπτώσεις ροών με ελαφρά κλίση είναι οι συνηθέστερα εμφανιζόμενες. Παρόλο που η διφασική ροή υγρού - αερίου σε κατακόρυφο αγωγό δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας κρίνεται σκόπιμη μία σύντομη εισαγωγή και στη ροή αυτή.

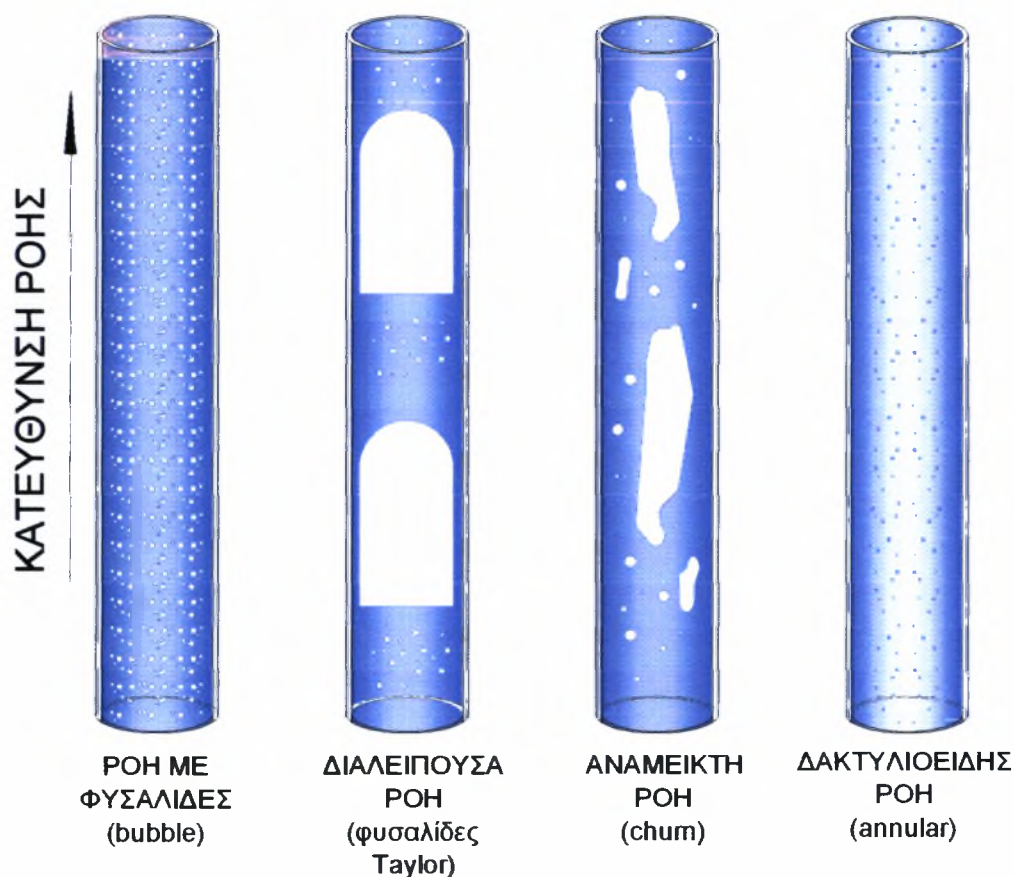
### 2.1 Καθεστώτα ροής

Για κατακόρυφη ροή προς τα πάνω οι Taitel et al. (1980) περιέγραψαν τους παρακάτω τύπους διφασικής ροής, οι οποίοι παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 2-1.

#### *Ροή με Φυσαλίδες (Bubble Flow)*

Κατά τη διφασική ροή με φυσαλίδες η υγρή φάση είναι συνεχής με την αέρια διασπαρμένη με τη μορφή μικρών φυσαλίδων. Παρατηρείται σε μικρή σχετικά ογκομετρική παροχή αερίου με πλήρη ανάμιξη της αέριας στην υγρή φάση και για διάμετρο αγωγού μεγαλύτερη των περίπου 5 cm.

Σε μεγαλύτερες παροχές υγρού αναφέρεται ως Ροή με Διασπαρμένες Φυσαλίδες (Bubbly Dispersed Flow), αν και η διαφοροποίηση των δύο υποκαθεστώτων είναι συνήθως δύσκολη.



Σχήμα 2-1 Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε κατακόρυφο αγωγό για ροή προς τα επάνω

#### Διαλείπουσα Ροή (Intermittent, «Slug» or «Plug» Flow)

Κύριο χαρακτηριστικό της διαλείπουσας ροής είναι οι αξονοσυμμετρικές μεγάλες φυσαλίδες αερίου, γνωστές ως φυσαλίδες Taylor (Taylor Bubble), που έχουν τη μορφή βλήματος. Η διάμετρός τους πλησιάζει τη

διάμετρο του αγωγού με ομοιόμορφη ανοδική κίνηση. Ανάμεσα στα τοιχώματα του αγωγού και στις φυσαλίδες Taylor το υγρό ρέει προς τα κάτω με μορφή λεπτής στιβάδας. Μεταξύ των φυσαλίδων Taylor υπάρχει συνεχής υγρή φάση με διεσπαρμένη την αέρια σε μικρές φυσαλίδες. Αυξάνοντας την ταχύτητα του αερίου ο λόγος του μήκους της φυσαλίδας Taylor ως προς το μήκος της υγρής φάσης μειώνεται και η ροή μεταπίπτει στη λεγόμενη ανάμεικτη ροή.

#### *Ανάμεικτη Ροή (Churn Flow)*

Κατά την ανάμεικτη ροή, υπάρχει μια έντονη ακατάστατη ανάμειξη των δυο φάσεων. Η αύξηση της ογκομετρικής παροχής της αέριας φάσης σε σχέση με τη διαλείπουσα ροή έχει ως αποτέλεσμα την παραμόρφωση και τη διάσπαση των φυσαλίδων Taylor, οι οποίες γίνονται ακανόνιστες, στενότερες με μεγάλες συγκεντρώσεις κατά φάση. Συχνά χαρακτηρίζεται ως φαινόμενο εισόδου, διότι η ροή έπειτα από ορισμένο μήκος σωλήνωσης (αναλόγως της διαμέτρου) μεταπίπτει σε διαλείπουσα ή δακτυλιοειδή. Κύριο γνώρισμά της είναι η ταλαντωτική κίνηση των τμημάτων της υγρής φάσης.

#### *Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow)*

Στην περίπτωση της δακτυλιοειδούς ροής, η αέρια φάση είναι συνεχής στο κέντρο του αγωγού με σχετική διασπορά της υγρής φάσης με μικρά σταγονίδια. Η υγρή φάση ρέει κυρίως στα τοιχώματα του αγωγού ως λεπτή στιβάδα.

Η μετάπτωση από το ένα καθεστώς ροής στο άλλο γίνεται συνήθως σταδιακά με συνέπεια την ύπαρξη περιοχών μεικτών καθεστώτων ροής.

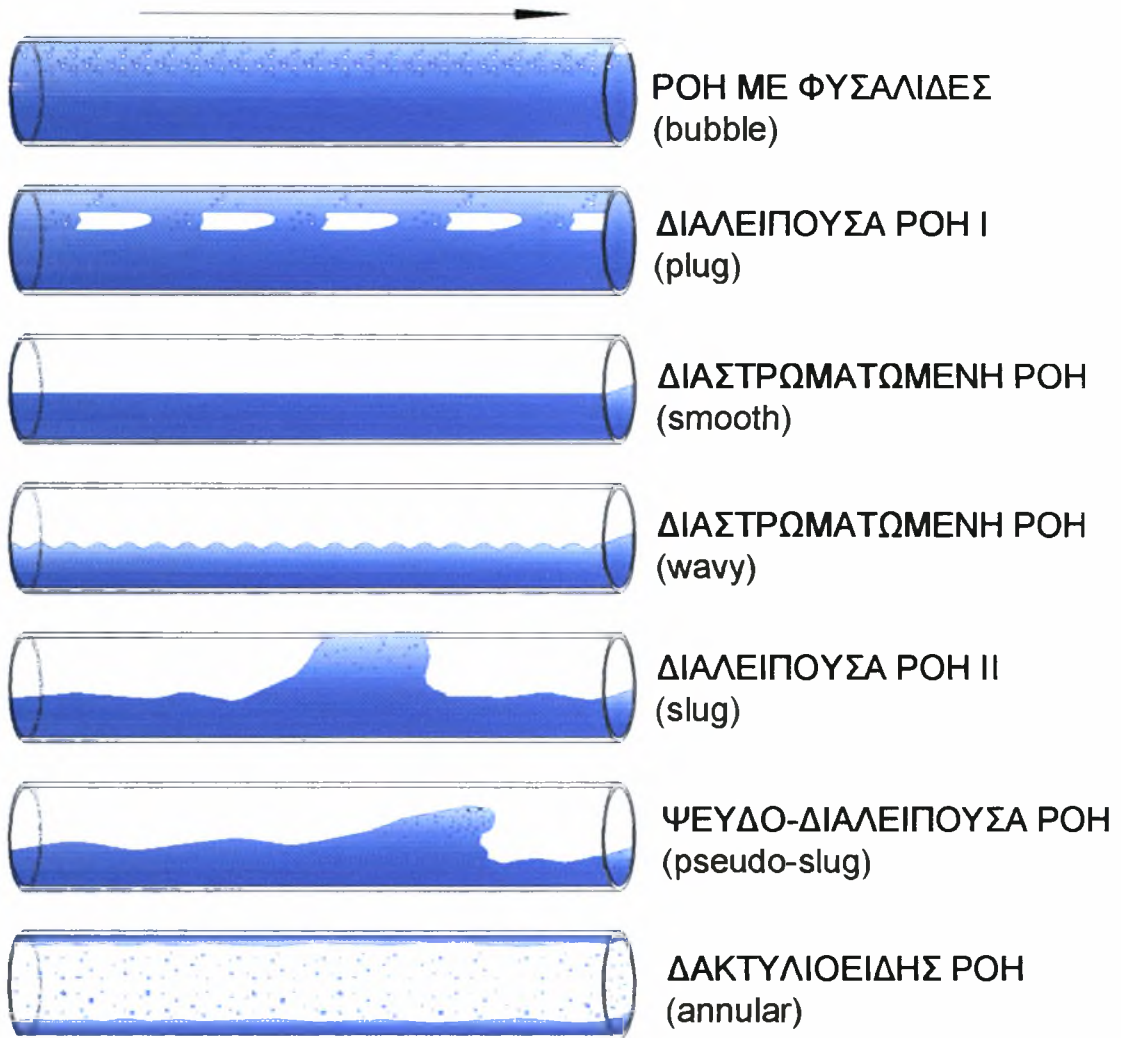
Κατά την κατακόρυφη ροή προς τα κάτω, τα καθεστώτα ροής είναι σαφώς διαφορετικά σε σχέση με την κατακόρυφη ροή προς τα πάνω. Το κύριο χαρακτηριστικό της ροής αυτής είναι η τάση δημιουργίας δακτυλιοειδούς ροής, η οποία εξάλλου δημιουργείται ακόμη και με μηδενική ογκομετρική παροχή της αέριας φάσης (falling films).

Σε οριζόντιους αγωγούς τα καθεστώτα ροής είναι πιο σύνθετα από ότι σε κατακόρυφους ως συνέπεια της επίδρασης της βαρύτητας, η οποία έχει την τάση να συγκεντρώνει το υγρό στον πυθμένα του αγωγού και το αέριο στο πάνω μέρος του. Σύμφωνα με τους Mandhane et al. (1974), Taitel & Dukler (1976) και Lin & Hanratty (1986) τα πλέον αποδεκτά καθεστώτα ροής είναι τα ακόλουθα και παρουσιάζονται σχηματικά στο Σχήμα 2-2.

#### *Ροή με φυσαλίδες (Dispersed Bubble Flow)*

Κατά τη ροή με φυσαλίδες το αέριο κινείται με τη μορφή φυσαλίδων διεσπαρμένο στη συνεχή υγρή φάση. Αυτό το καθεστώς ροής σχηματίζεται για μεγάλους ρυθμούς παροχής του υγρού. Οι φυσαλίδες έχουν την τάση να συγκεντρωθούν στο πάνω μέρος του αγωγού, ενώ υπό ορισμένες συνθήκες εμφανίζονται ως αφρός.

## ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΡΟΗΣ



Σχήμα 2-2 Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό

### Διαστρωματωμένη Ροή (Stratified Flow)

Κατά την διαστρωματωμένη ροή το υγρό ρέει στον πυθμένα του αγωγού και το αέριο στο πάνω μέρος. Το καθεστώς αυτό παρατηρείται για σχετικά μικρές ποσότητες ρευστών. Η διεπιφάνεια των ρευστών είναι λεία ή καλύπτεται από κόμματα, κάτι που εξαρτάται από την ταχύτητα της αέριας φάσης. Επιπλέον, για μεγάλες παροχές της αέριας φάσης το υγρό μπορεί να αναρριχάται στο σωλήνα και να λαμβάνει χώρα εκ νέω σταγονιδίων.

### *Διαλείπουσα Ροή («Slug» or Intermittent Flow)*

Η διαλείπουσα ροή χαρακτηρίζεται από τη διέλευση περιοδικών υγρών μαζών («slugs») από το σωλήνα, που κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα της αέριας φάσης. Αυτές οι υγρές μάζες μπορεί να εμπεριέχουν και να παρασύρουν πολλές φυσαλίδες αέριου. Η ροή αυτή είναι ιδιαίτερα ανεπιθύμητη για τις περισσότερες εφαρμογές, διότι προκαλεί απότομες αυξήσεις της πίεσης με αποτέλεσμα να προκαλούνται δονήσεις στις σωληνώσεις, να απαιτούνται μεγάλοι διαχωριστές κ.α. Έτσι είναι μείζονος βιομηχανικής σημασίας η πρόβλεψη της μετάπτωσης στο καθεστώς αυτό.

### *Ψευδο-Διαλείπουσα Ροή («Pseudo-Slug» Flow)*

Η ψευδο-διαλείπουσα ροή παρατηρείται πάντοτε αμέσως μετά την διαλείπουσα ροή. Χαρακτηρίζεται από τη διέλευση περιοδικών υγρών μαζών («pseudo-slugs») από το σωλήνα, που κινούνται με ταχύτητα που η τιμή της είναι αρκετά μικρότερη από την ταχύτητα της αέριας φάσης. Έτσι, καθώς οι μάζες αυτές ρέουν με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα του αερίου, η περίμετρος του αγωγού διαβρέχεται περιοδικά από την υγρή φάση αλλά η αέρια φάση παραμένει ως ένα σημείο συνεχής. Συνήθως περιορίζονται σε μικρής διαμέτρου αγωγούς.

### *Δακτυλιοειδής Ροή (Annular Flow)*

Η δακτυλιοειδής ροή είναι παρόμοια με αυτή που παρατηρείται στην κατακόρυφη ροή, με την διαφορά ότι η υγρή στιβάδα δεν είναι συμμετρική

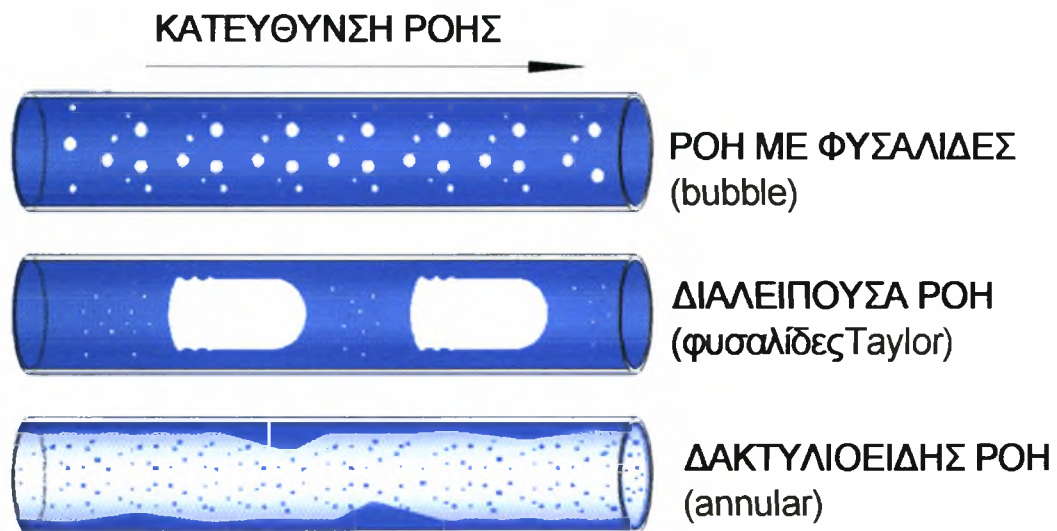
γύρω από τον αγωγό λόγω της επίδρασης της βαρύτητας. Εμφανίζεται για πολύ μεγάλες παροχές της αέριας φάσης. Σχεδόν πάντοτε στη δακτυλιοειδή ροή, μέρος του υγρού βρίσκεται συμπαρασυρόμενο από την αέρια φάση με τη μορφή σταγονιδίων.

Για την κατακόρυφη ροή και για την οριζόντια διφασική ροή έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία πολυάριθμοι χάρτες καθεστώτων ροής. Βέβαια οι περισσότεροι από αυτούς έχουν προκύψει από πειραματικά δεδομένα σε μικρούς αγωγούς (20 - 50 mm διάμετρο), για το σύστημα νερό - αέρας και για ατμοσφαιρικές συνθήκες.

Οι περισσότεροι χάρτες καθεστώτων ροής που συναντώνται στη βιβλιογραφία έχουν δημιουργηθεί για τις περιπτώσεις οριζόντιων ή κατακόρυφων αγωγών, ενώ πολύ λίγες προσπάθειες έχουν γίνει για την περιγραφή των καθεστώτων σε κεκλιμένους αγωγούς. Στην περίπτωση των κεκλιμένων αγωγών, όταν η κλίση του αγωγού είναι προς τα κάτω, τότε η υγρή φάση ρέει με μεγαλύτερες ταχύτητες εξαιτίας της βαρυτικής δύναμης και κατά συνέπεια, είναι απαραίτητοι μεγαλύτεροι ρυθμοί ροής και για τις δυο φάσεις ώστε να συμβεί η μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη ροή στη διαλείπουσα και όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης αυξάνεται και το εύρος της περιοχής της διαστρωματωμένης ροής. Αντίστοιχα, σε αγωγούς με κλίση προς τα πάνω το εύρος της διαστρωματωμένης ροής μειώνεται και είναι ταχύτερη η μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η οριζόντια διφασική ροή συναντάται πολύ συχνά σε διαστημικές εφαρμογές, όπου η βαρύτητα είναι

σχεδόν μηδενική. Στις περιπτώσεις αυτές τα καθεστώτα ροής διαφοροποιούνται όπως φαίνεται και το Σχήμα 2-3, ενώ τα χαρακτηριστικά του κάθε καθεστώτος αλλά και οι συνθήκες στις οποίες εξελίσσεται εξαρτώνται από την κατεύθυνση του και από την κλίση του αγωγού (Jayawardena et al., 1997).



**Σχήμα 2-3** Σχηματική παράσταση των καθεστώτων ροής σε οριζόντιο αγωγό σε συνθήκες απουσίας βαρύτητας (Jayawardena et al., 1997)

Τρία κύρια καθεστώτα ροής παρατηρούνται σε συνθήκες απουσίας βαρύτητας, η ροή με φουσαλίδες, η διαλείπουσα ροή και η δακτυλιοειδής ροή, ενώ η δακτυλιοειδής ροή κυριαρχεί για μεγάλο εύρος ρυθμών ροής υγρής και αέριας φάσης όταν η τιμή της βαρύτητας είναι πολύ μικρή. Η ροή με φουσαλίδες και η δακτυλιοειδής ροή είναι αυτές που προτιμώνται, καθώς η διαλείπουσα ροή προκαλεί έντονες δονήσεις στους αγωγούς.



Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι φυσικές ιδιότητες των ρευστών καθώς και η κλίση του αγωγού επιδρούν έντονα στο καθεστώς ροής που επικρατεί μέσα στον αγωγό. Ακολουθεί μία ανασκόπηση των εργασιών για την επίδραση του ιξώδους της υγρής φάσης στα χαρακτηριστικά της ροής καθώς και αυτών που αναφέρονται σε ροή με κλίση του αγωγού.

## 2.2 Επίδραση του ιξώδους

Μία από τις πρώτες εργασίες που εστίασαν στην μελέτη της επίδρασης του ιξώδους της υγρής φάσης στα χαρακτηριστικά της διφασικής ροής σε κανάλι ήταν η εργασία των Hanratty & Hershman (1961). Συγκεκριμένα, διεξήγαγαν πειράματα σε κανάλι ορθογωνικής διατομής (30,0 cm x 2,5 cm) μήκους 6,1 m και για τιμές του ιξώδους της υγρής φάσης που κυμάνθηκαν μεταξύ 1,0 και 6,6 cP, όπου  $1,0 \text{ cP} = 10^{-3} \text{ Pa s}$ . Παρατήρησαν ότι όσο αυξάνεται το ιξώδες της υγρής φάσης, η μετάπτωση επέρχεται σε ελαφρώς χαμηλότερες παροχές της αέριας φάσης. Τονίζουν ωστόσο ότι σε περίπτωση διφασικής ροής σε κανάλι κυκλικής διατομής τα παραπάνω αποτελέσματα πιθανώς να μην ισχύουν λόγω διαφορετικότητας στην γεωμετρία του συστήματος.

Οι Weisman et al. (1979) εξέτασαν την επίδραση του ιξώδους της υγρής φάσης κατά τις μεταπτώσεις σε διάφορα καθεστώτα της διφασικής ροής για την περίπτωση οριζόντιων αγωγών. Παρατήρησαν ότι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει τα καθεστώτα ροής είναι οι σχετικές ογκομετρικές παροχές της

υγρής και της αέριας φάσης. Όσον αφορά την επίδραση του ιξώδους της υγρής φάσης, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δεν είναι ιδιαίτερα έντονη.

Αργότερα, ο Andritsos (1986) μελέτησε την επίδραση που έχει το ιξώδες της υγρής φάσης στα διάφορα καθεστώτα της διφασικής ροής, διεξάγοντας πειράματα σε αγωγούς 2,5 και 9,5 cm χρησιμοποιώντας σύστημα νερό με γλυκερίνη - αέρας για ιξώδη που κυμάνθηκαν στην περιοχή 1-80 cP. Παρατήρησε ότι για σταθερή ταχύτητα υγρού και αυξάνοντας το ιξώδες της υγρής φάσης η ταχύτητα της αέριας φάσης που απαιτείται για την έναρξη των διδιάστατων κυμάτων μειώνεται γεγονός που οδηγεί στη μείωση του εύρους εμφάνισής τους. Όμως, η μετάπτωση σε ροή με κύματα τύπου Kelvin - Helmholtz (K - H) δεν φαίνεται να επηρεάζεται ιδιαίτερα. Πιο συγκεκριμένα, όταν το ιξώδες της υγρής φάσης είναι μεγαλύτερο των 20 cP τότε τα διδιάστατα αυτά κύματα δεν εμφανίζονται καθόλου και η ροή μεταπίπτει από λεία διαστρωματωμένη σε ροή με κύματα τύπου K - H. Επιπλέον, συμπεραίνεται ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ιξώδες, τόσο μικρότερη είναι η παροχή της υγρής φάσης που απαιτείται για την μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή, όχι όμως τόσο δραματικά όσο προβλέπει η θεωρία των Taitel & Dukler. Τέλος, η περιοχή στο χάρτη στην οποία εμφανίζεται η ψευδο-διαλείπουσα ροή συρρικνώνεται σημαντικά με την αύξηση του ιξώδους.

Η Barnea (1991) ανέπτυξε ένα μοντέλο λαμβάνοντας υπόψη τις διατμητικές τάσεις ώστε να υπολογίζει την επίδραση του ιξώδους στην ευστάθεια της διαστρωματωμένης διφασικής ροής υγρού - αερίου σε διάφορες γωνίες κλίσης και το ονόμασε «ιξώδης ανάλυση Kelvin - Helmholtz» (viscous

Kelvin - Helmholtz analysis). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματά της με το μοντέλο των Taitel & Dukler (1976), διαπίστωσε ότι για χαμηλές τιμές του ιξώδους της υγρής φάσης, το μοντέλο των Taitel & Dukler είναι πολύ αξιόπιστο ενώ όσο αυξάνεται το ιξώδες αυξάνεται και η ασυμφωνία των αποτελεσμάτων. Το αντίθετο ακριβώς διαπίστωσε συγκρίνοντας το μοντέλο της με τη «μη ιξώδη ανάλυση Kelvin - Helmholtz» (inviscid Kelvin - Helmholtz analysis). Επιπλέον, στην οριζόντια ροή, η αύξηση του ιξώδους αυξάνει το ύψος της υγρής στιβάδας και συνεπώς τις ταχύτητες μετάπτωσης. Μία σημαντική παρατήρηση που έγινε είναι ότι στη ροή με κλίση προς τα πάνω, για υψηλές τιμές του ιξώδους, το μοντέλο των Taitel & Dukler προβλέπει πλήρη απουσία σταθερής διαστρωματωμένης ροής σε αντίθεση με την ιξώδη ανάλυση Kelvin - Helmholtz. Επιπλέον, για χαμηλές παροχές της αέριας φάσης, ο λόγος  $h/D$  (όπου  $h$  το πάχος της υγρής στιβάδας και  $D$  η διάμετρος του αγωγού) καθορίζεται κυρίως από την ισορροπία μεταξύ διατμητικής τάσης και βαρύτητας ενώ για υψηλές παροχές της αέριας φάσης μεγάλες τιμές του ιξώδους συνεπάγονται μεγαλύτερα πάχη της υγρής στιβάδας. Συμπεραίνει λοιπόν ότι το ιξώδες δρα σταθεροποιητικά για χαμηλές παροχές αερίου. Τέλος, παρατηρεί ότι το μοντέλο των Taitel & Dukler παραμένει η καλύτερη μέθοδος για την πρόβλεψη της μετάπτωσης από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ή δακτυλιοειδή ροή λόγω της σχετικής μαθηματικής απλότητάς του, για υγρά σχετικά χαμηλού ιξώδους (έως 100 cP) και για όλο το εύρος των κλίσεων και των διαμέτρων του αγωγού και για κάθε αλλαγή της αέριας φάσης.

Οι Newton et al. (1999) διεξήγαγαν πειράματα σε οριζόντιο αγωγό εσωτερικής διαμέτρου 5,0 cm και συνολικού μήκους 12,0 m με υγρά διαφορετικού ιξώδους. Για ύψη της υγρής στιβάδας μεγαλύτερα από 1,5 cm παρατήρησαν διδιάστατα κύματα μεγάλου πλάτους (της τάξης του 1,0 cm), ενώ για χαμηλότερα ύψη της υγρής στιβάδας παρατήρησαν μικρές κυματώσεις με πλάτος μικρότερο από 0,2 cm. Οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης καθυστερεί την έναρξη δημιουργίας διδιάστατων κυμάτων μεγάλου πλάτους, παρόλο που η μετάπτωση σε ροή με μικρούς κυματισμούς για χαμηλά ύψη της υγρής στιβάδας φαίνεται ανεξάρτητη του ιξώδους. Τέλος, μετά την μετάπτωση σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα, η δομή της κυματοειδούς επιφάνειας είναι ανεξάρτητη του ιξώδους.

Δύο χρόνια αργότερα, οι Funada and Joseph (2001) μελέτησαν θεωρητικά την επίδραση του ιξώδους της υγρής φάσης χρησιμοποιώντας την ιξώδη ανάλυση δυναμικής ροής (viscous potential flow analysis).

Συμπέραναν ότι ο λόγος ιξώδους,  $\hat{\mu} = \frac{\mu_G}{\mu_L}$ , καθώς και ο λόγος πυκνότητας,

$\hat{\rho} = \frac{\rho_G}{\rho_L}$ , είναι καθοριστικής σημασίας για την πρόβλεψη της μετάπτωσης σε

διαλείπουσα ροή. Ως όριο διαχωρισμού των υγρών υψηλού ιξώδους ( $\hat{\mu} < \hat{\rho}$ ) από τα υγρά χαμηλού ιξώδους ( $\hat{\mu} > \hat{\rho}$ ) όρισαν η σχέση  $\hat{\mu} = \hat{\rho}$  και στο όριο αυτό η κρίσιμη ταχύτητα παίρνει την μέγιστη τιμή. Συμπέραναν ότι η κρίσιμη ταχύτητα (δηλαδή η ταχύτητα στην οποία επέρχεται μετάπτωση) των υγρών με ιξώδες μεγαλύτερο από 15 cP είναι ανεξάρτητη του ιξώδους, ενώ για υγρά

με ιξώδες μικρότερο των 15 cP, όπως το νερό, σημειώνεται έντονη μείωση της τιμής της. Τα συμπεράσματα αυτά έρχονται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα του Andritsos (1986).

### 2.3 Επίδραση της κλίσης του αγωγού

Οι Beggs & Brill (1973) είναι από τους πρώτους που πραγματοποίησαν πειράματα για την κατανόηση και την περιγραφή των χαρακτηριστικών της ροής σε κεκλιμένους αγωγούς. Διαπίστωσαν την αδυναμία των μέχρι τότε συσχετισμών για τον υπολογισμό της συγκράτησης της υγρής φάσης και της πτώσης πίεσης σε κεκλιμένους αγωγούς. Εξέτασαν το σύστημα νερό – αέρας από 0 έως  $\pm 90^\circ$  σε αγωγούς διατομής 1 και 5 in και παρατήρησαν έντονη εξάρτηση από την κλίση του αγωγού.

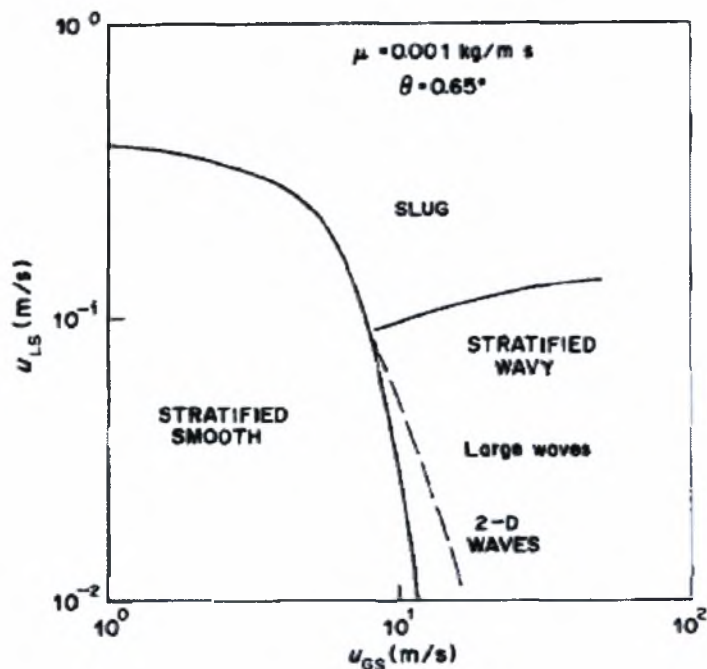
Πειραματική μελέτη της ροής σε κεκλιμένους αγωγούς διεξήγαγαν επίσης και οι Barnea et al. (1980). Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων τους στο σύστημα αέρας – νερό χρησιμοποίησαν δύο αγωγούς διαμέτρου 2,55 και 1,95 cm για κλίσεις του αγωγού που κυμάνθηκαν μεταξύ  $-10,0^\circ$  και  $+10,0^\circ$ . Η κύρια επίδραση της κλίσης του αγωγού παρατηρείται κατά την μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη στη διαλείπουσα ή τη δακτυλιοειδή ροή. Διαπίστωσαν ότι για ροή με κλίση προς τα πάνω (ακόμη και για γωνίες μικρότερες από  $1,0^\circ$ ) η περιοχή όπου εμφανίζεται η διαλείπουσα ροή διευρύνεται εις βάρος της διαστρωματωμένης περιοχής ροής, η οποία συρρικνώνεται σε μία μικρή περιοχή με σχήμα καμπάνας. Για γωνίες μεγαλύτερες από  $10,0^\circ$  η

διαστρωματωμένη ροή δεν εμφανίζεται καθόλου. Για ροή με κλίση προς τα κάτω, λόγω της επίδρασης της βαρύτητας, το υγρό κινείται γρηγορότερα και το ύψος της υγρής στιβάδας είναι χαμηλότερο. Ως αποτέλεσμα απαιτούνται υψηλότερες παροχές και των δύο φάσεων για να λάβει χώρα η μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη ροή και έτσι η περιοχή της διαστρωματωμένης ροής διευρύνεται αισθητά με την αύξηση της κλίσης του αγωγού.

Οι Barnea et al. (1980) προσπάθησαν επίσης να αξιολογήσουν το μοντέλο που πρότειναν οι Taitel & Dukler (1976). Διαπίστωσαν ότι για οριζόντιους αγωγούς προβλέπει πολύ ικανοποιητικά τις μεταπτώσεις σε όλα τα καθεστώτα ροής. Από τις συγκρίσεις που έκαναν, οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο των Taitel & Dukler είναι εφαρμόσιμο με πολύ καλή ακρίβεια για αγωγούς με κλίση  $\pm 10^\circ$ , ενώ για γωνίες κλίσης μεταξύ  $10^\circ$  και  $30^\circ$  μπορεί να γίνει μόνο ποιοτική πρόβλεψη. Αντίθετα η μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη ροή σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα δεν προβλέπεται, ιδιαίτερα σε αγωγούς με κλίση προς τα κάτω. Σύμφωνα με το μοντέλο των Taitel & Dukler, τα κύματα στη διεπιφάνεια προκαλούνται από την ροή της αέριας φάσης λόγω της μεταφοράς ενέργειας μεταξύ αέριας και υγρής φάσης. Ωστόσο, όπως διαπιστώθηκε, σε ροή με κλίση προς τα κάτω τα κύματα αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια ακόμη και απουσία της αέριας φάσης. Εξάγεται λοιπόν το συμπέρασμα ότι για μικρές παροχές της αέριας φάσης η μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη ροή σε ροή με κύματα εξαρτάται από την ταχύτητα της υγρής φάσης και το ύψος της διεπιφάνειας και επηρεάζεται σημαντικά από την κλίση του αγωγού.

Λίγο αργότερα οι ίδιοι ερευνητές μελέτησαν εκτενέστερα τη ροή με κλίση προς τα κάτω (Barnea et al., 1982) καθώς και τη ροή με κλίση προς τα πάνω (Barnea et al., 1985) και πρότειναν τροποποιήσεις των μοντέλων Taitel & Dukler (1976) και Barnea et al. (1980) για την περιγραφή των μεταπτώσεων στα διάφορα καθεστώτα ροής ώστε να γίνεται περιγραφή των πειραματικών αποτελεσμάτων με καλύτερη ακρίβεια.

Οι Andreussi & Persen (1987) διεξήγαγαν πειράματα σε κεκλιμένο προς τα κάτω αγωγό μήκους 26 m και διαμέτρου 5,0 cm για γωνίες κλίσης  $+0,65^\circ$  και  $+2,1^\circ$ . Παρατήρησαν 3 διαφορετικά υποκαθεστώτα στην περιοχή της διαστρωματωμένης ροής : λεία, διδιάστατα κύματα (2D) και κύματα μεγάλων διαταραχών.



Σχήμα 2-4 Χάρτης καθεστώτων ροής (Andreussi & Persen, 1987)

Όπως αναμενόταν οι Andreussi & Persen παρατήρησαν ότι στη ροή προς τα κάτω η περιοχή της διαστρωματωμένης ροής διευρύνεται σε σχέση με τους οριζόντιους αγωγούς. Επίσης, παρατήρησαν ότι η μετάπτωση σε διαστρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα έχει ως επακόλουθο τη σημαντική αύξηση της πτώσης πίεσης. Τέλος, υποστηρίζουν ότι για μεγάλες παροχές της υγρής φάσης η μετάπτωση σε ροή με κύματα 2D συμπίπτει με τη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή.

Οι Kokal and Stanislav (1989a) επίσης πραγματοποίησαν πειράματα σε κεκλιμένους αγωγούς μήκους 25 m χρησιμοποιώντας το σύστημα πετρέλαιο - αέρας. Μελετήθηκαν τα καθεστώτα ροής και οι μεταπτώσεις σε αυτά για 3 διαφορετικές διαμέτρους του αγωγού (2,58, 5,12 και 7,63 cm) και 7 γωνίες κλίσης ( $0, \pm 1, \pm 5$  και  $\pm 9^\circ$ ) και προτάθηκαν νέα βελτιωμένα μοντέλα. Παρατήρησαν ότι τα καθεστώτα ροής εξαρτώνται έντονα από τη γωνία κλίσης του αγωγού, κυρίως κατά τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή, αφού ακόμη και μία μικρή απόκλιση πάνω από τον οριζόντιο αγωγό μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την καμπύλη μετάπτωσης. Διαπιστώθηκε επίσης ότι στην ροή προς τα πάνω κυριαρχεί η διαλείπουσα ροή, ενώ στη ροή προς τα κάτω η διαστρωματωμένη. Η μετάπτωση από τη διαλείπουσα στη δακτυλιοειδή και στη ροή με διεσπαρμένες φυσαλίδες διαπιστώθηκε σχεδόν ανεξάρτητη της γωνίας κλίσης, ενώ η μεταβολή της διαμέτρου του αγωγού επιδρά σε όλα τα όρια μετάπτωσης. Τέλος, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με το μοντέλο των Taitel & Dukler (1976)



διαπίστωσαν ότι προβλέπει σωστά μόνο την μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή.

Οι Kokal and Stanislav (1989b) μελέτησαν επίσης την επίδραση του καθεστώτος ροής και της γωνίας κλίσης του αγωγού στη συγκράτηση της υγρής φάσης και την πτώση πίεσης. Διαπίστωσαν ότι η γωνία κλίσης επιδρά και στα δύο χαρακτηριστικά της ροής. Κατά την διαστρωματωμένη ροή με κλίση προς τα κάτω σημειώθηκε χαμηλή συγκράτηση υγρού και πτώση πίεσης σε αντίθεση με τη διαλείπουσα ροή με κλίση προς τα πάνω, ως αποτέλεσμα του γεγονότος ότι στη ροή προς τα κάτω κυριαρχεί η διαστρωματωμένη ροή ενώ στη ροή προς τα πάνω κυριαρχεί η διαλείπουσα ροή. Παρατήρησαν τέλος ότι το τροποποιημένο μοντέλο των Dukler & Hubbard (1975) προβλέπει ικανοποιητικά αποτελέσματα για τη συγκράτηση υγρού και την πτώση πίεσης κατά τη διαλείπουσα ροή.

Λίγο αργότερα οι Brauner and Maron (1992) εξέτασαν τις μεταπτώσεις στα υποκαθεστώτα της διαστρωματωμένης ροής σε αγωγούς με κλίση. Διαπίστωσαν ότι για ροή συστήματος νερού - αέρα με κλίση προς τα πάνω, η περιοχή του καλώς τοποθετημένου προβλήματος (well-posed) μειώνεται σημαντικά και δημιουργούνται περιορισμένες περιοχές (σε σχήμα καμπάνας) στις οποίες επικρατεί η λεία διαστρωματωμένη ροή. Για τη ροή με κλίση προς τα κάτω καθώς και για την οριζόντια ροή βρέθηκε ότι η μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή ελέγχεται κυρίως από την υγρή φάση.

Οι Grolman et al. (1996) μελέτησαν πειραματικά τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή σε ελαφρώς κεκλιμένους αγωγούς με

κλίση προς τα πάνω για δύο διαμέτρους (2,6 και 5,1 cm) και δέκα γωνίες κλίσης (από 0,1° έως 6,0°). Ανέπτυξαν ένα μοντέλο στηριζόμενο στη μέση συγκράτηση της υγρής φάσης, η οποία μεγιστοποιείται στο όριο μετάπτωσης και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό της μετάπτωσης. Διαπίστωσαν ότι μικρές γωνίες κλίσης έχουν μεγάλο αντίκτυπο στα καθεστώτα ροής για χαμηλές φαινομενικές ταχύτητες της αέριας φάσης. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε ότι η συγκράτηση υγρού κατά τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή είναι υψηλότερη για τις μικρότερες γωνίες κλίσης και εξαιτίας της μεγάλης ποσότητας υγρής φάσης που παραμένει στον αγωγό, οι υψηλές τιμές της συγκράτησης της υγρής φάσης λόγω της αστάθειας οδηγούν στη δημιουργία μεγάλων αρχικών «slugs». Επίσης, συμπέραναν ότι για πολύ μικρές γωνίες κλίσης η δημιουργία «slug» μπορεί να ανασταλεί όταν η διαφορά ύψους εισόδου και εξόδου του αγωγού είναι μικρότερη από μία διάμετρό του και η συγκράτηση μικρότερη από 0,07. Τέλος, παρατήρησαν ότι η κρίσιμη φαινομενική ταχύτητα του αερίου αυξάνεται με την αύξηση της διαμέτρου.

Οι Grolman & Fortuin (1997), για τη διατήρηση της αξιοπιστίας του κριτηρίου μετάπτωσης που προτείνουν οι παραπάνω ερευνητές, θεωρούν ότι θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο «MARS» για τον υπολογισμό των παραμέτρων της ροής (συγκράτηση υγρής φάσης και πτώση πίεσης), το οποίο προκαλεί σχετικό σφάλμα μικρότερο από 10%.

Αργότερα, οι Woods et al. (2000) μελέτησαν πειραματικά την επίδραση μικρών κλίσεων του αγωγού προς τα κάτω στο σχηματισμό «slug».

Χρησιμοποίησαν αγωγό διαμέτρου 7,63 cm και μήκους 23,0 m σε γωνίες κλίσης 0,2, 0,5 και 0,8°. Διαπίστωσαν ότι η βαρύτητα διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο σε χαμηλές παροχές της αέριας φάσης και για παροχές αέριας φάσης μεγαλύτερες από 5 m/s η μετάπτωση εξαρτάται ασθενώς από την κλίση του αγωγού, δείχνοντας ότι οι αδρανειακές επιδράσεις της ροής του αερίου υπερτερούν έναντι των σταθεροποιητικών επιδράσεων της βαρύτητας. Επίσης παρατήρησαν ότι η αύξηση της γωνίας κλίσης σταθεροποιεί την υγρή στιβάδα. Συμπέρασμα αυτής της εργασίας είναι ότι η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή σχετίζεται με την εμφάνιση κυμάτων πολύ μεγάλου μήκους ( $\lambda \approx 5,0 - 10,0$  m) και η συχνότητα εμφάνισης των «slug» ταυτίζεται με τη συχνότητα εμφάνισης αυτών των κυμάτων. Τέλος, έγινε φανερό ότι τα κύματα μεγάλου αλλά και μικρού μήκους παίζουν ρόλο στην έναρξη της διαλείπουσας ροής σε αγωγούς με κλίση προς τα κάτω, καθώς η φωτογραφική μελέτη της διαδικασίας μετάπτωσης επιβεβαιώνει την πρόταση του Kordyban (1985) ότι τα «slug» αναπτύσσονται λόγω τοπικών ασταθειών Kelvin - Helmholtz κυμάτων μικρού μήκους που σχηματίζονται στις κορυφές κυμάτων μεγάλου μήκους.

Οι Simmons and Hanratty (2001) μελέτησαν πειραματικά την επίδραση μικρών κλίσεων προς τα πάνω στην μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή σε αγωγό διαμέτρου 7,63 cm και μήκους 23,0 m για γωνίες κλίσης 0,0°, 0,05°, 0,20°, 0,40° και 1,20°. Παρατήρησαν ότι ο μηχανισμός δημιουργίας των «slugs» για αγωγούς με κλίση προς τα πάνω διαφέρει από το μηχανισμό που επικρατεί στους οριζόντιους αγωγούς, σε μια περιοχή όπου η

διεπιφανειακή τάση της αέριας φάσης δεν μπορεί να συγκρατήσει την υγρή, η οποία ρέει αντίθετα και οδηγείται στην είσοδο του αγωγού. Διαπιστώθηκε ότι τα «slugs» σχηματίζονται όταν η συγκέντρωση της υγρής φάσης στην είσοδο του αγωγού λόγω αντιστροφής της ροής προκαλεί τέτοια αύξηση του πάχους της υγρής στιβάδας, ώστε η ταχύτητα του αερίου να είναι αρκετή για να προκαλέσει αστάθεια Kelvin – Helmholtz. Τα «slugs» που σχηματίζονται σε αυτήν την περιοχή, μεταφέρουν όλο το υγρό έξω από τον αγωγό, ενώ η διαστρωματωμένη ροή που επικρατεί μεταξύ των «slugs» μεταφέρει υγρό πίσω στην είσοδο. Εκτός της περιοχής αντιστροφής της ροής, τα «slugs» σχηματίζονται από την ανάπτυξη κυμάτων στη σταθερή διαστρωματωμένη ροή. Για γωνίες κλίσης μεγαλύτερες των  $0,4^\circ$  τα «slugs» εξελίσσονται από κύματα Kelvin – Helmholtz όπως προκύπτει από την ανάλυση των Andritsos et al.(1989), ενώ για γωνίες κλίσης μικρότερες από  $0,4^\circ$  εξελίσσονται είτε μέσω του μηχανισμού ανάπτυξης των κυμάτων όπως προτάθηκε από τους Fan et al. (1993), είτε, για μεγάλες παροχές της υγρής φάσης μέσω του μηχανισμού Kelvin – Helmholtz. Τέλος, για πολύ μικρές παροχές της υγρής φάσης είναι πιθανή η εμφάνιση σταθερής διαστρωματωμένης ροής.

Πρόσφατα, οι Lioumbas et al. (2005) διεξήγαγαν πειράματα σε αγωγό διαμέτρου 2,4 cm και μήκους 7,0 m σε κλίσεις έως  $9,0^\circ$  για τη μελέτη της επίδρασης της υγρής φάσης στη δομή της διεπιφάνειας. Έπειτα από οπτικές παρατηρήσεις και μετρήσεις του πάχους της υγρής στιβάδας διέκριναν τέσσερα υπο-καθεστάτα διαστρωματωμένης ροής: για χαμηλές παροχές υγρής και αέριας φάσης εμφανίζονται κύματα μικρού πλάτους, με αύξηση της

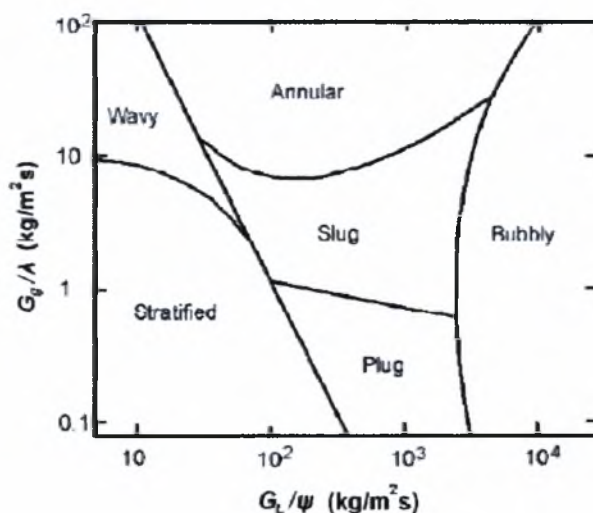
παροχής της υγρής φάσης η διεπιφάνεια γίνεται λεία, για ακόμη μεγαλύτερες παροχές της υγρής φάσης εμφανίζονται διδιάστατα κύματα μεγάλου πλάτους και σχετικά μεγάλου μήκους και, τέλος, με περαιτέρω αύξηση της παροχής, τα μεγάλα αυτά κύματα γίνονται συχνότερα και τείνουν να σχηματίσουν τρισδιάστατες δομές. Σε χαμηλές τιμές του αριθμού Reynolds, παρόλο που εμφανίζονται κύματα μικρού πλάτους, η ροή της υγρής φάσης διατηρείται στρωτή πριν την εμφάνιση των μοναχικών κυμάτων. Τα μοναχικά κύματα φαίνεται να σχετίζονται με τη μετάπτωση από στρωτή σε τυρβώδη ροή ανεξαρτήτως της γωνίας κλίσης. Η ασυνεχής εμφάνιση των κυμάτων αυτών σχετίζεται άμεσα με την ασυνεχώς εμφανιζόμενη τυρβώδη ροή της υγρής στιβάδας σε ένα εύρος τιμών του αριθμού Re μεταξύ 2000 και 3000. Επιπλέον, τα μοναχικά κύματα σχετίζονται με την τύρβη που παράγεται στην υγρή στιβάδα κοντά στα τοιχώματα του αγωγού.

## **2.4 Χάρτες καθεστώτων ροής και όρια μεταπτώσεων**

Η πρόβλεψη του καθεστώτος ροής που επικρατεί σε έναν αγωγό κατά την ομοροή υγρού – αερίου παίζει καθοριστικό ρόλο στον υπολογισμό των μεγεθών που διέπουν τη ροή. Το καθεστώς ροής καθορίζεται από το λόγο του εμβαδού της διεπιφάνειας των ρευστών ανά μονάδα όγκου και συνεπώς ρυθμίζει τη μεταφορά ενέργειας, μάζας και ορμής μεταξύ των δύο φάσεων. Η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού που λαμβάνει χώρα κατά τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή, καθιστά τη

μετάπτωση αυτή ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα. Για τους λόγους αυτούς λοιπόν, έχουν γίνει αρκετές προσπάθειες τα τελευταία 50 χρόνια ούτως ώστε να αναπτυχθούν μοντέλα που να περιγράφουν τη μετάπτωση από το ένα καθεστώς ροής στο άλλο. Ορισμένα από αυτά περιγράφονται παρακάτω.

Από τους πρώτους που προσπάθησαν να περιγράψουν τη μετάπτωση από το ένα είδος ροής στο άλλο σε οριζόντιο αγωγό ήταν ο Baker (1954), ο οποίος κατασκεύασε χάρτες, έχοντας πρώτα διακρίνει τα διάφορα καθεστώτα ροής. Αναγκάστηκε να εισάγει διορθωτικές παραμέτρους, καθώς διέθετε πειραματικά δεδομένα μόνο από μετρήσεις σε συστήματα νερού - αέρα σε ομορροή σε ατμοσφαιρικές συνθήκες, ώστε ο χάρτης να μπορεί να βρει εφαρμογή και σε διαφορετικά συστήματα και συνθήκες. Επίσης διατύπωσε και τις αντίστοιχες εξισώσεις που περιγράφουν τη μετάπτωση από το ένα καθεστώς ροής στο άλλο στον ακόλουθο χάρτη ο οποίος είχε ως συντεταγμένες  $G_g/\lambda$  ως προς  $G_L/\psi$ , (όπου  $G_g$ ,  $G_L$  οι μαζικές ταχύτητες αέρας και υγρής φάσης).



Σχήμα 2-5 Χάρτης καθεστώτων ροής σύμφωνα με τον Baker (1954)

Οι διορθωτικοί παράγοντες ορίζονται ως εξής:

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\rho_G}{0.075} \right) \left( \frac{\rho_L}{62.3} \right) \right]^{0.5} \quad (2.4.1)$$

$$\psi = \frac{73}{\sigma} \left[ \mu_L \left( \frac{62.3}{\rho_L} \right)^2 \right]^{1.3} \quad (2.4.2)$$

όπου:

G: αέρια φάση, L: υγρή φάση

Σύμφωνα με τους Wallis & Dodson, (1973) ο χάρτης αυτός είναι εύχρηστος μόνο για αρχικές εκτιμήσεις καθώς δεν είναι ιδιαίτερα ακριβής. Αρχικά, η τεταγμένη του χάρτη δεν είναι αδιάστατη με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η ευρεία εφαρμογή του. Συνυπολογίζοντας δε τις πολυάριθμες παραμέτρους που επιδρούν στη διφασική ροή (αδρανειακές και ιζώδεις δυνάμεις στις δυο φάσεις, επιφανειακή τάση και άνωση), γίνεται αντιληπτό ότι είναι αδύνατο να περιγράφεται η μετάπτωση στα διάφορα καθεστώτα ροής από τις ίδιες παραμέτρους. Συνεπώς, η μετάπτωση σε κάθε καθεστώς ροής θα έπρεπε να ερευνηθεί υπολογίζοντας τα καθεστώτα ξεχωριστά.

Οι Wallis & Dodson (1973) ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο που περιγράφει τη μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη ροή σε ήπια («plug») ή έντονα («slug») διαλείπουσα ροή διεξάγοντας πειράματα σε αγωγούς ορθογωνικής διατομής. Διαπίστωσαν ότι και τα δύο καθεστώτα διαλείπουσας ροής δημιουργούνται εξαιτίας της παρουσίας ενός μεγάλου κύματος στη διεπιφάνεια υγρού - αερίου. Υποστήριξαν ότι η μετάπτωση και στα δυο αυτά

καθεστῶτα προκαλείται από την αστάθεια τύπου Kelvin - Helmholtz και τα αντιμετωπίσαν σαν ένα καθεστῶς.

Η διαφορά στην προσέγγιση αυτή σε σχέση με τις υπόλοιπες έγκειται στο γεγονός ότι δεν στηρίζεται στην ανάλυση μικρών διεπιφανειακών διαταραχών, αλλά στο δεδομένο ότι δημιουργείται ένα μεγάλο κύμα που κλείνει τον αγωγό, υπό την επίδραση δυνάμεων Bernoulli που αναπτύσσονται από την αέρια φάση.

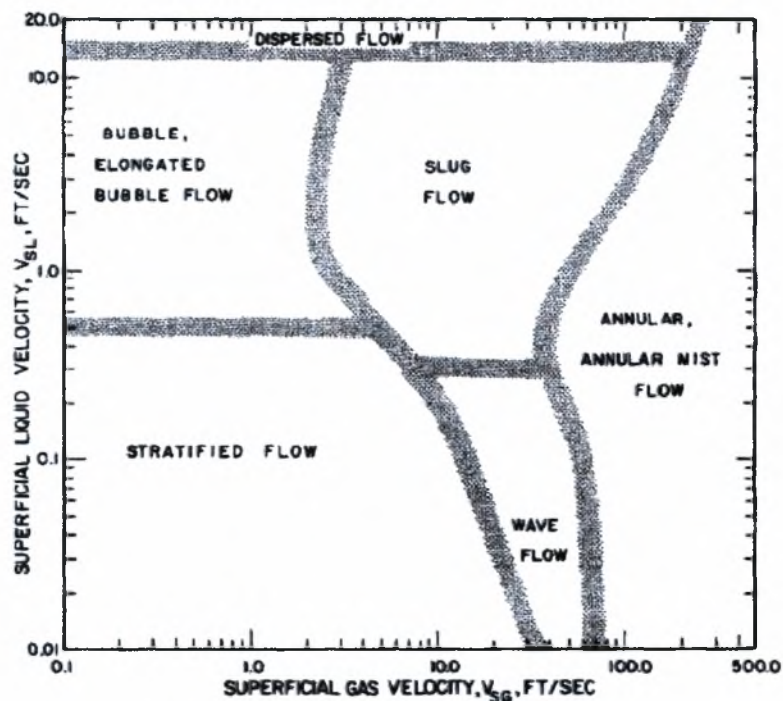
Οι Kordyban and Ranov (1970) πρότειναν ότι η μετάπτωση από διαστρωματωμένη ροή σε διαλείπουσα σε κλειστό αγωγό οφείλεται στην αστάθεια τύπου Kelvin - Helmholtz, η οποία ενισχύεται από την επαφή με το επάνω τοίχωμα του αγωγού και εξαρτάται από το πλάτος του κύματος.

Η αστάθεια τύπου Kelvin - Helmholtz λαμβάνει χώρα στην περίπτωση που η κίνηση του κύματος μετατρέπεται από περιοδική σε εκθετική καθώς η ταχύτητα της αέριας φάσης είναι αρκετά μεγάλη και η συνισταμένη της πίεσης που βρίσκεται σε φάση με το ύψος του κύματος είναι τέτοιου μεγέθους, ώστε η αναρρόφηση που δημιουργείται να είναι μεγαλύτερη από την αντιτιθέμενη δύναμη.

Παρατηρήθηκε ότι για συγκεκριμένη γεωμετρία αγωγού και φυσικές ιδιότητες, οι τέσσερις βασικές μεταβλητές που επιδρούν στη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή είναι η ταχύτητα του αερίου, το ύψος της υγρής στιβάδας, το μήκος και το πλάτος του κύματος. Ωστόσο, από την πειραματική μελέτη προέκυψε ότι οι μεταβλητές που επηρεάζουν τη μετάπτωση είναι μόνο η ταχύτητα του αερίου και το ύψος της υγρής στιβάδας.



Οι Mandhane et al. (1974), εξετάζοντας τους μέχρι τότε διαθέσιμους χάρτες ροής, διαπίστωσαν ότι ήταν δυνατές αρκετές βελτιώσεις, ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν να είναι πιο ακριβή. Μελέτησαν το σύστημα νερού - αέρα σε οριζόντιους αγωγούς διαμέτρου από 1,3 cm έως 15 cm σκοπεύοντας να εντοπίσουν τα εμφανιζόμενα καθεστώτα ροής που εμφανίζονται και να κατασκευάσουν έναν χάρτη αυτών. Χρησιμοποίησαν ως συντεταγμένες τις φαινομενικές ταχύτητες  $u_{GS}$  και  $u_{LS}$  ώστε ο χάρτης να είναι απλός στην χρήση. Ισχυρίστηκαν ότι η επίδραση της διαμέτρου και των φυσικών ιδιοτήτων των δύο φάσεων μπορεί να αγνοηθεί. Εκτός της ικανοποιητικής ακρίβειας που παρουσιάζει, πλεονέκτημα του χάρτη αυτού είναι ότι καθιστά δυνατή την αναπαράσταση του καθεστώτος ροής με φυσαλίδες.



Σχήμα 2-6 Χάρτης καθεστώτων ροής όπως προτάθηκε από τους Mandhane et al. (1974)

Οι Taitel & Dukler (1976) διαπίστωσαν ότι για οριζόντιους και σχεδόν οριζόντιους αγωγούς εσωτερικής διαμέτρου 2-5 cm η μετάπτωση δεν επηρεάζεται σημαντικά από μεταβολές της διαμέτρου και για το λόγο αυτό, οι χάρτες σαν των Mandhane et al. (1974), είναι αρκετά ακριβείς, καθώς τα περισσότερα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή τους προήλθαν από αγωγούς μικρής διαμέτρου. Επίσης, παρατήρησαν ότι οι χάρτες αυτοί δεν αναπαριστούν σωστά την περιοχή όπου αναπτύσσονται τα καθεστώτα ροής όταν διαφοροποιηθεί το εξεταζόμενο σύστημα, π.χ. πετρέλαιο - φυσικό αέριο, ενώ η διάμετρος του αγωγού επηρεάζει σημαντικά τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή. Έτσι πρότειναν τη χρήση αδιάστατων αριθμών, αναλόγως της περιοχής ροής, για την περιγραφή της μετάπτωσης.

Στην προσέγγισή τους προσπάθησαν να λάβουν υπόψη την επίδραση της διαμέτρου, των φυσικών ιδιοτήτων και της κλίσης του αγωγού στη μετάπτωση και στις εξισώσεις που ανέπτυξαν όλα τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη είναι συνάρτηση μόνο του αδιάστατου όρου  $h/D$ .

Οι Mishima & Ishii (1980) μελέτησαν τη μετάπτωση από τη διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή και προσπάθησαν να επεκτείνουν τη θεωρία των Korđyban & Ranov (1970). Θεωρώντας ότι τα κύματα είναι μικρού πλάτους, ότι το κύμα που αυξάνεται με το μεγαλύτερο ρυθμό, το «πιο επικίνδυνο κύμα», παρατηρείται τη στιγμή της μετάπτωσης σε διαλείπουσα

ροή και έχει μία μέγιστη τιμή πλάτους, συμπέραναν ότι η επιφανειακή τάση μπορεί να αγνοηθεί εάν θεωρηθεί συνολική συμπεριφορά του κύματος.

Αργότερα, οι Lin & Hanratty (1986) λόγω της αδυναμίας της μη ιξώδους Kelvin - Helmholtz θεωρίας να προβλέπει σωστά τη μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή σε χαμηλά ιξώδη της υγρής φάσης, καθώς αγνοεί τους αδρανειακούς όρους που αποσταθεροποιούν τη ροή, προσπάθησαν να αναπτύξουν μια θεωρία, όπου να λαμβάνονται υπόψη οι ιξώδεις και οι αδρανειακοί όροι, με αποτέλεσμα η μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή να επέρχεται σε χαμηλότερες ταχύτητες αέριας φάσης, από αυτές που προβλέπονταν από την μη ιξώδη Kelvin - Helmholtz θεωρία. Στόχος της ανάλυσης τους ήταν η πρόβλεψη των συνθηκών, όπου μια ημιτονοειδής διαταραχή μικρού πλάτους και μεγάλου μήκους κύματος στη διεπιφάνεια υγρού - αερίου, είναι ασταθής και πρότειναν κριτήρια μετάπτωσης για αγωγούς ορθογωνικής και κυκλικής διατομής.

Ο Korabyan (1985) παρατήρησε ότι η μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή λαμβάνει χώρα εξαιτίας μιας τοπικής αστάθειας Kelvin - Helmholtz, στην κορυφή του κύματος. Έπειτα από πειράματα, διαπίστωσε ότι πριν από τη μετάπτωση εμφανίζονται πάντα μικρά κύματα στην κορυφή των μεγάλων. Η μετάπτωση στη διαλείπουσα ροή οφείλεται στην απότομη αύξηση του μεγέθους αυτών των μικρών κυμάτων. Πρότεινε ότι η εμφάνιση των κυμάτων αυτών αποτελεί την έναρξη της αστάθειας Kelvin - Helmholtz, αλλά ισχυρίζεται ότι η δημιουργία των κυμάτων στη διαστρωματωμένη ροή οφείλεται στον ακόλουθο μηχανισμό. Για ταχύτητες της αέριας φάσης

μεγαλύτερες από της υγρής, δημιουργούνται κύματα στη διεπιφάνεια εξαιτίας της συνιστώσας της πίεσης που βρίσκεται σε φάση με την κλίση του κύματος. Τα κύματα αυτά αναπτύσσονται σχετικά αργά, αλλά σταδιακά κλείνουν μέρος του αγωγού, προκαλώντας μεγάλη μεταβολή στην πίεση. Με τον τρόπο αυτό τα κύματα προσεγγίζουν την αστάθεια Kelvin - Helmholtz. Ωστόσο, πριν λάβει χώρα αστάθεια ολόκληρου του κύματος, συμβαίνουν τοπικές αστάθειες στην κορυφή του κύματος εξαιτίας της μεγάλης κλίσης της πίεσης στο σημείο αυτό και της μικρής κλίσης του κύματος. Ως αποτέλεσμα, δημιουργούνται μικρά κύματα στην κορυφή των μεγάλων και αναπτύσσονται μέχρι να αγγίξουν το πάνω μέρος του αγωγού.

Λίγο αργότερα, οι Lin & Hanratty (1986) παρατήρησαν ότι για τιμές ιξώδους από 1 έως 100 cP, δεν παρουσιάζεται έντονη επίδραση στη μετάπτωση σε διαλείπουσα ροή, ενώ για τιμές μεγαλύτερες από 500 cP οι όροι των αδρανειακών δυνάμεων τείνουν να εξαφανιστούν. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω ανάλυση παρουσιάζει ικανοποιητική συμφωνία με πειραματικά αποτελέσματα για μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή.

Η θεωρία που ανέπτυξαν για το σύστημα νερό - αέρας οι Lin & Hanratty (1986) προβλέπει ότι οι δυνάμεις αδράνειας της υγρής φάσης δρουν αποσταθεροποιητικά, με αποτέλεσμα η εμφάνιση διαταραχών μεγάλου πλάτους στη διεπιφάνεια να επέρχεται σε παροχές αερίου μικρότερες από αυτές που προβλέπει η μη ιξώδης Kelvin - Helmholtz θεωρία (Andritsos et al., 1989). Ακόμη, προβλέπει ότι η αύξηση του ιξώδους δρα σταθεροποιητικά κατά τη μετάπτωση στα διάφορα καθεστώτα ροής. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται

στο γεγονός ότι για σταθερό λόγο  $h/D$  και το αυξανόμενο ιξώδες, η ταχύτητα της υγρής φάσης μειώνεται για δεδομένη φαινομενική ταχύτητα αερίου και οι δυνάμεις αδράνειας του υγρού δρουν λιγότερο αποσταθεροποιητικά. Ωστόσο, για πολύ μεγάλες τιμές του ιξώδους, η δράση αυτή σχεδόν εξαφανίζεται και τα αποτελέσματα της μη ιξώδους Kelvin - Helmholtz ανάλυσης είναι πιο αξιόπιστα. Τέλος, ήταν οι πρώτοι οι οποίοι απέδειξαν ότι η μη ιξώδης Kelvin - Helmholtz θεωρία δεν είναι ικανή να περιγράψει σωστά την ευστάθεια της διαστρωματωμένης ροής.

Οι Andritsos & Hanratty (1987b) μελέτησαν τη μετάπτωση από λεία διαστρωματωμένη σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα σε αγωγό κυκλικής διατομής οριζόντιας τρεις επιμέρους περιοχές της διαστρωματωμένης ροής διδιάστατα κύματα, κύματα μεγάλου πλάτους ή Kelvin - Helmholtz κύματα και τέλος την εκνέφωση σταγονιδίων υγρού, όπου το υγρό αναρριχάται στο σωλήνα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι έλαβαν υπόψη τους ιξώδεις όρους, ενώ για αρκετά μεγάλο μήκος κύματος  $\lambda$  χρησιμοποίησαν την ανάλυση των Lin & Hanratty. Επίσης, παρατήρησαν ότι για υγρά μεγάλου ιξώδους το φαινόμενο ελέγχεται από τον μηχανισμό Kelvin - Helmholtz. Τέλος, παρατήρησαν ότι κύρια επίδραση του ιξώδους είναι η αύξηση της ταχύτητας του αερίου που απαιτείται για την έναρξη της δημιουργίας των διδιάστατων κυμάτων και η μείωση του εύρους των συνθηκών ροής όπου αυτά εμφανίζονται.

Οι Wu et al. (1987) έπειτα από πειράματα σε αγωγό διαμέτρου 20,3 cm, αξιολόγησαν τα μοντέλα που πρότειναν οι Taitel & Dukler (1976) και ο Wallis (1969). Διαπίστωσαν ότι για κυλινδρικό αγωγό διαμέτρου 2,45 cm σε

ατμοσφαιρικές συνθήκες τα δυο παραπάνω μοντέλα σχεδόν ταυτίζονται, ενώ στην περίπτωση αγωγού διαμέτρου 20,3 cm και πίεση 75 bar, το μοντέλο του Wallis (1969) προβλέπει μεγαλύτερες παροχές της υγρής φάσης στις οποίες επέρχεται η μετάπτωση από διαστρωματωμένη σε διαλείπουσα ροή. Τα παραπάνω συμπεράσματα επιβεβαιώθηκαν και από τα πειραματικά αποτελέσματα.

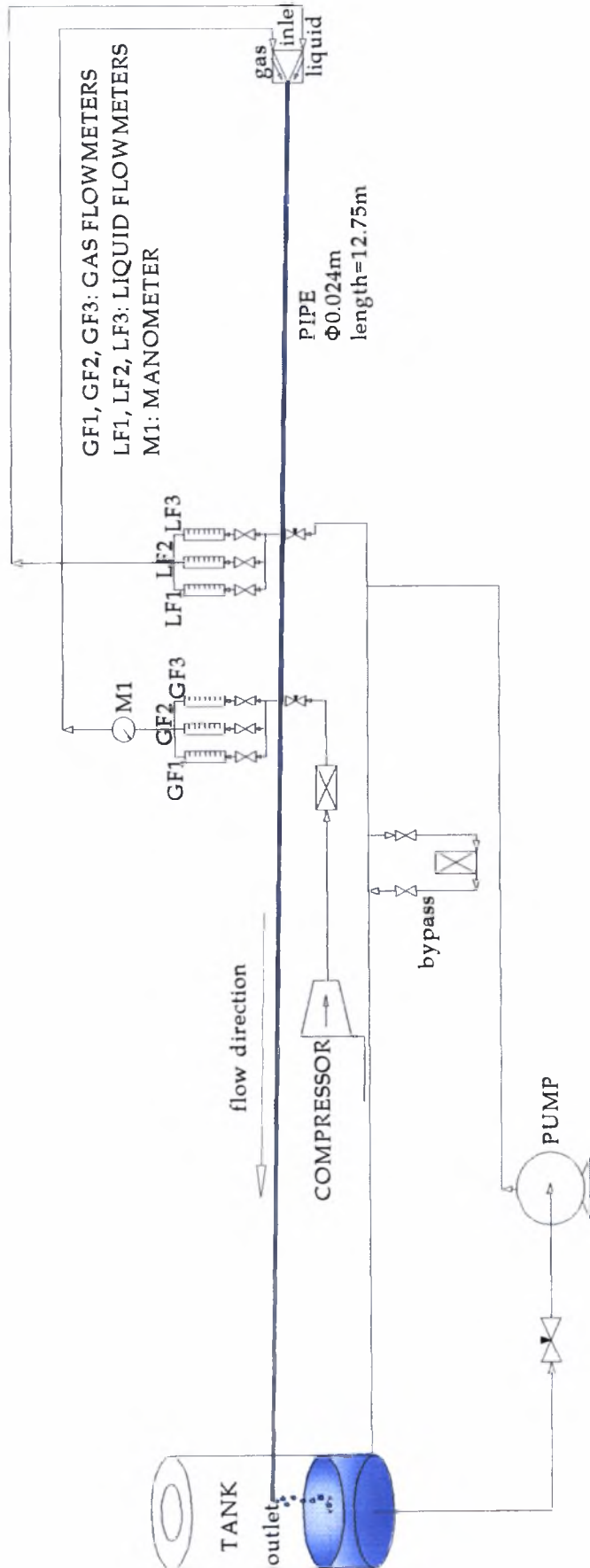
Τέλος, σύμφωνα με τους (Fan et al., 1993), οι συνθήκες που επικρατούν στη είσοδο και στην έξοδο καθώς και το μήκος του αγωγού, επιδρούν στην εμφάνιση της διαλείπουσας ροής. Όπως παρατηρήθηκε το μήκος του αγωγού παρουσιάζει πολύ πιο έντονη επίδραση στην εξέλιξη του καθεστώτος ροής συγκριτικά με τις συνθήκες στην είσοδο και έξοδο του αγωγού. Σε αγωγούς μεγαλύτερου μήκους, η απόσταση του σημείου όπου εμφανίζεται το «slug» και του σημείου όπου εξέρχεται από τον αγωγό είναι μεγαλύτερη από αυτήν σε αγωγούς μικρότερου μήκους, κατά συνέπεια, τη στιγμή της εξόδου του «slug» από τον αγωγό, το ύψος της υγρής στιβάδας είναι μεγαλύτερο στο σημείο όπου εμφανίζεται.

### Κεφάλαιο 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Η σχηματική παράσταση της διάταξης που χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή των πειραμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-1. Η διάταξη αποτελείται από έναν οριζόντιο αγωγό διαμέτρου 0.024 m κατασκευασμένο από Plexiglass®, ο οποίος απαρτίζεται από 8 επιμέρους τμήματα μήκους 0,25 m, 1,0 m και 2,0 m. Το συνολικό μήκος του αγωγού είναι 12,75 m και περιλαμβάνει το τμήμα εισόδου, το τμήμα ανάπτυξης της ροής, το τμήμα μετρήσεων και το τμήμα εξόδου. Το πάχος του αγωγού είναι ικανό (περίπου 7.5 mm) ώστε να διασφαλίζεται η μηχανική αντοχή του, ενώ τα άκρα των επιμέρους τμημάτων είναι συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιούνται οι διαταραχές στη ροή. Για τη στεγανοποίηση χρησιμοποιήθηκαν ειδικά ελαστικά δαχτυλίδια (o-rings), τοποθετημένα έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το διάκενο μεταξύ των τμημάτων του αγωγού.

Το τμήμα ανάμιξης των δύο φάσεων είναι τύπου «Υ», όπου οι δύο φάσεις εισάγονται υπό γωνία  $-35^\circ$  και  $+35^\circ$  ως προς τον οριζόντιο αγωγό. Η απόσταση μεταξύ του σημείου εισόδου και του πρώτου τμήματος μετρήσεων είναι 7 m, δηλαδή περίπου όσο η διάμετρος του αγωγού πολλαπλασιασμένη επί

300.



Σχήμα 3-1 Σχηματικό Διάγραμμα της Πειραματικής Διάταξης.



Στο τέλος του αγωγού η ροή εισάγεται σε δοχείο διαχωρισμού φάσεων. Η αέρια φάση εξέρχεται από την κορυφή του διαχωριστή, ενώ η υγρή φάση συγκεντρώνεται στον πυθμένα του. Η υγρή φάση ανακυκλώνεται με τη βοήθεια φυγοκεντρικής αντλίας για το νερό και γρاناζωτής αντλίας για τα μίγματα γλυκερίνης. Στο εσωτερικό του δοχείου διαχωρισμού και στο κάτω μέρος του βρίσκεται ψυκτική σπείρα για τον έλεγχο της θερμοκρασίας της υγρής φάσης που ανακυκλοφορεί στο σύστημα. Η θερμοκρασία της υγρής φάσης μετριέται με τη βοήθεια θερμομέτρου και σε όλη τη διάρκεια των πειραμάτων παρέμεινε σταθερή στους  $16\pm 1^{\circ}\text{C}$  για το σύστημα νερού - αέρα και για το σύστημα υδατικό διάλυμα βουτανόλης - αέρα και για το σύστημα νερού - γλυκερίνης - αέρα παρέμεινε σταθερή στους  $15\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

Ως υγρή φάση για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε νερό δικτύου, υδατικό διάλυμα βουτανόλης και δύο διαλύματα νερού - γλυκερίνης, 60% κ.ο. και 74% κ.ο. Το ιξώδες του νερού και του υδατικού διαλύματος βουτανόλης ήταν 1 cP για μία μέση θερμοκρασία  $16^{\circ}\text{C}$  κατά τη διάρκεια των πειραμάτων όπως προέκυψε από τον Πίνακα 1 του Παραρτήματος και η πυκνότητα  $999\text{ kg/m}^3$  από τον Πίνακα 2 του Παραρτήματος. Σύμφωνα με τον Πίνακα 3 το ιξώδες των διαλυμάτων γλυκερίνης ήταν 14 cP για το διάλυμα περιεκτικότητας 60% κ.ο. σε γλυκερίνη και 46 cP για το διάλυμα περιεκτικότητας 74% κ.ο. σε γλυκερίνη, ενώ η πυκνότητα προέκυψε  $1156\text{ kg/m}^3$  και  $1195\text{ kg/m}^3$  αντίστοιχα από τον Πίνακα 4. Η ρύθμιση της παροχής της υγρής φάσης γίνεται με τη βοήθεια μιας βάνας διαφράγματος και η μέτρηση της παροχής με τρία ροόμετρα τα οποία έχουν

βαθμονομηθεί ογκομετρικά. Τα γραφήματα που προέκυψαν κατά την βαθμονόμηση των ροομέτρων δίνονται στο Παράρτημα (Σχήματα Π.1 έως Π.4). Για την αποφυγή στραγγαλισμού της αντλίας στην έξοδό της υπάρχει μία παράκαμψη της ροής (by-pass) που οδηγεί το επιπλέον υγρό στη δεξαμενή.

Ως αέρια φάση χρησιμοποιήθηκε αέρας δικτύου. Η τροφοδοσία του αέρα γίνεται μέσω ενός συμπιεστή AIRCO M529 (4 HP). Η παροχή της αέριας φάσης ρυθμίζεται με τη βοήθεια μίας βάνας διαφράγματος και μετριέται με τρία ροόμετρα αντίστοιχα. Η βαθμονόμηση των ροομέτρων της αέριας φάσης έγινε με το μετρητικό Ritter 40 (ελάχιστη παροχή 0.4 m<sup>3</sup>/h και μέγιστη 65 m<sup>3</sup>/h).

Το πάχος της υγρής στιβάδας μετριέται σε δύο θέσεις κατά μήκος του αγωγού, η πρώτη βρίσκεται σε απόσταση 88 D από την είσοδο και η δεύτερη σε απόσταση 336 D από την είσοδο. Για τη μέτρησή του χρησιμοποιείται η αγωγιμομετρική τεχνική.

Η αγωγιμομετρική τεχνική χρησιμοποιείται μόνο όταν η υγρή φάση είναι (ή μπορεί να γίνει) αγώγιμη και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Swanson. Βασίζεται στη χρήση αισθητήρα (probe), που όταν βρίσκεται σε επαφή με την υγρή φάση δίνει υψηλό σήμα εξόδου, ενώ σε επαφή με την αέρια φάση δίνει σχεδόν μηδενικό. Για τον προσδιορισμό των περιοχών ροής χρησιμοποιείται κατάλληλος συνδυασμός ηλεκτροδίων.

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα ανάμεσα σε δύο μεταλλικά σέρματα κάθετα στη διεύθυνση της ροής ενός αγώγιμου ρευστού, που εκτείνεται στο άπειρο

προς όλες τις άλλες διευθύνσεις, δίνεται από την ακόλουθη σχέση (όπως αναφέρεται από τον Laurinut, 1982):

$$C = \frac{\pi \gamma h}{\ln \left[ \frac{D_o + \sqrt{(D_o^2 - d^2)}}{d} \right]}$$

όπου :

C : ηλεκτρική αγωγιμότητα

h : πάχος της υγρής στιβάδας

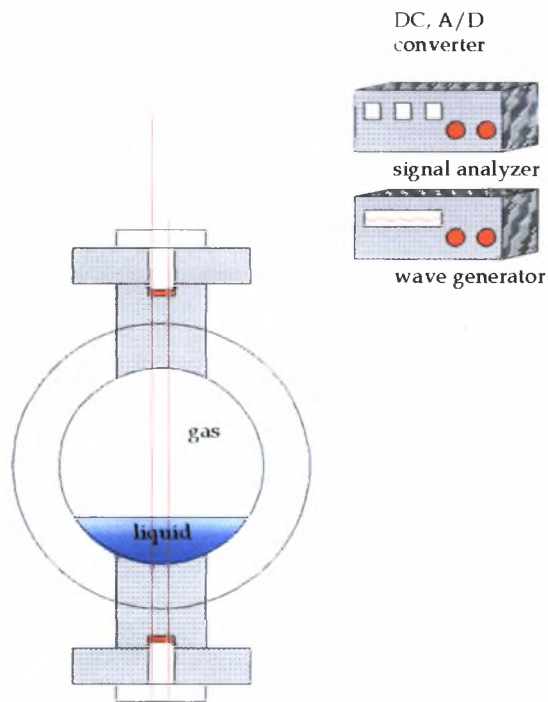
γ : ειδική αγωγιμότητα της υγρής φάσης

D<sub>o</sub> : απόσταση μεταξύ των συρμάτων

d : διάμετρος των συρμάτων

Στο Σχήμα 3-2 φαίνεται η διάταξη που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας με την αγωγιμομετρική τεχνική, ενώ σε κάθε αισθητήρα υπάρχουν 2 ζεύγη παράλληλων συρμάτων που μετράνε το ύψος της υγρής στιβάδας κάθε φορά. Τα σύρματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν ανοξειδωτα σύρματα (chromel) διαμέτρου 0,4 mm και απείχαν μεταξύ τους 3 mm.

Ο αισθητήρας (probe) τροφοδοτείται με εναλλασσόμενη τάση υψηλής συχνότητας (25 kHz) ώστε να αποφευχθεί ηλεκτρόλυση του υγρού από τη γεννήτρια HAMEG HM 8030, 5 MHz. Η μεταβολή της αγωγιμότητας μεταξύ των λεπτών μεταλλικών συρμάτων, λόγω της μεταβολής του πάχους της υγρής στιβάδας, προκαλεί μεταβολές στο πλάτος του εναλλασσόμενου ρεύματος που τροφοδοτεί το κύκλωμα. Οι μεταβολές αυτές, οι οποίες μετρούνται στα άκρα



**Σχήμα 3-2** Μειρητικό στοιχείο ζεύγους παράλληλων συρμάτων και η σύνδεση με τον αναλυτή σήματος

μιας μικρής αντίστασης ( $50 \Omega$ ), τροφοδοτούνται σε ειδικό ηλεκτρονικό αναλυτή. Ο αναλυτής αποτελείται από ένα διαφορικό ενισχυτή, που ενισχύει τις πολύ μικρές μεταβολές της τάσης, καθώς και από το τμήμα αναδιαμόρφωσης και φιλτραρίσματος του σήματος. Η εναλλασσόμενη τάση συχνότητας  $25 \text{ kHz}$ , που τροφοδοτείται στον αναλυτή, είναι διαμορφωμένη κατά πλάτος, δηλαδή η μεταβολή του πλάτους της αντιστοιχεί στις μεταβολές της τάσης στα άκρα της αντίστασης. Ηλεκτρικό κύκλωμα εξασφαλίζει στην έξοδο του συνεχή τάση απαλλαγμένη από την υψηλή συχνότητα του φορέα και ανάλογη των μεταβολών του πάχους της υγρής σιβάδας.

Η αγωγιμότητα της υγρής φάσης μετριέται με αγωγιμόμετρο (METROHM) στην αρχή και στο τέλος κάθε σειράς πειραμάτων, ώστε τυχόν

μεταβολές της θερμοκρασίας και κατά συνέπεια και της αγωγιμότητας να ληφθούν υπόψη στη μέτρηση του πάχους της υγρής στιβάδας.

Το ιξώδες της υγρής φάσης για τα διαλύματα γλυκερίνης - νερού μετριέται με τη χρήση διαθλασίμετρου. Αρχικά μετριέται ο δείκτης διάθλασης του υγρού και στη συνέχεια αντιστοιχίζεται η τιμή αυτή με την τιμή του ιξώδους σύμφωνα με τον Πίνακα 6 του Παραρτήματος.

Οι φωτογραφικές λήψεις έγιναν με τη χρήση της φωτογραφικής μηχανής Nikon D90 έπειτα από προσθήκη χρωστικής ουσίας στο διάλυμα της γλυκερίνης για κλίση  $1^\circ$  και θερμοκρασία  $15^\circ\text{C}$ .

## Κεφάλαιο 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της εργασίας. Στόχος των πειραμάτων είναι η μελέτη της επίδρασης της κλίσης του αγωγού, του ιξώδους και της επιφανειακής τάσης της υγρής φάσης στις μεταπτώσεις μεταξύ διαλείπουσας και ψευδο-διαλείπουσας ροής αλλά και μεταξύ της ψευδο-διαλείπουσας και της διαστρωματωμένης ροής με κύματα. Αρχικά, γίνεται παρουσίαση των πρωτογενών δεδομένων του πειράματος, δηλαδή της εξέλιξης του πάχους της υγρής στιβάδας με το χρόνο σε αντιπαραβολή με φωτογραφικές απεικονίσεις των αντίστοιχων καθεστώτων της ροής που λήφθηκαν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων. Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των χαρτών καθεστώτων ροής που προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων. Τέλος, παρατίθενται συγκεντρωτικά γραφήματα για κάθε περίπτωση και δίνονται ποιοτικές εξηγήσεις των παρατηρήσεων που έγιναν.

### 4.1 Γενικά

Κατά τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων παρατηρήθηκαν τρία κύρια καθεστάτα ροής στο εσωτερικό του αγωγού: διαλείπουσα ροή («slug» flow), ψευδο-διαλείπουσα ροή («pseudo-slug» flow) και διαστρωματωμένη

ροή με κύματα (stratified wavy flow). Η διαστρωματωμένη ροή με κύματα, σύμφωνα με τις πειραματικές παρατηρήσεις, διαχωρίζεται σε δύο υποκαθεστώτα: τη διαστρωματωμένη ροή με διδιάστατα κύματα (2D wave flow) και τη διαστρωματωμένη ροή με κύματα Kelvin - Helmholtz (K-H wave flow).

Η αστάθεια Kelvin - Helmholtz εμφανίζεται όταν υπάρχει αισθητή διαφορά ταχύτητας κατά μήκος της διεπιφάνειας των δύο ρευστών. Η αστάθεια φανερώνεται υπό μορφή κυμάτων που δημιουργούνται στην επιφάνεια του υγρού τα οποία καλούνται κύματα Kelvin - Helmholtz. Η θεωρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει την αρχή της αστάθειας σε ρευστά διαφορετικών πυκνοτήτων που κινούνται με διάφορες ταχύτητες. Τα κύματα του τύπου αυτού αναπτύσσονται όταν η αποσταθεροποιητική δράση των δυνάμεων αδράνειας της υγρής φάσης και οι διακυμάνσεις της πίεσης, οι οποίες είναι σε φάση με το ύψος του κύματος, υπερνικήσουν τη σταθεροποιητική δράση των βαρυτικών δυνάμεων και της επιφανειακής τάσης.

Λόγω της δυσκολίας στον σαφή οπτικό διαχωρισμό μεταξύ διαλείπουσας και ψευδο-διαλείπουσας ροής, χρησιμοποιείται ως κριτήριο η τιμή του λόγου  $h/D$ , όπου  $h$  το ύψος της υγρής φάσης όπως μετριέται με την αγωγιμομετρική μέθοδο και  $D$  η διάμετρος του αγωγού. Το κριτήριο έχει ως εξής: αν  $0,90 \leq h/D \leq 1,00$ , το ύψος της υγρής φάσης κλείνει ολόκληρη σχεδόν τη διατομή του αγωγού και συνεπώς στον αγωγό επικρατεί διαλείπουσα ροή,

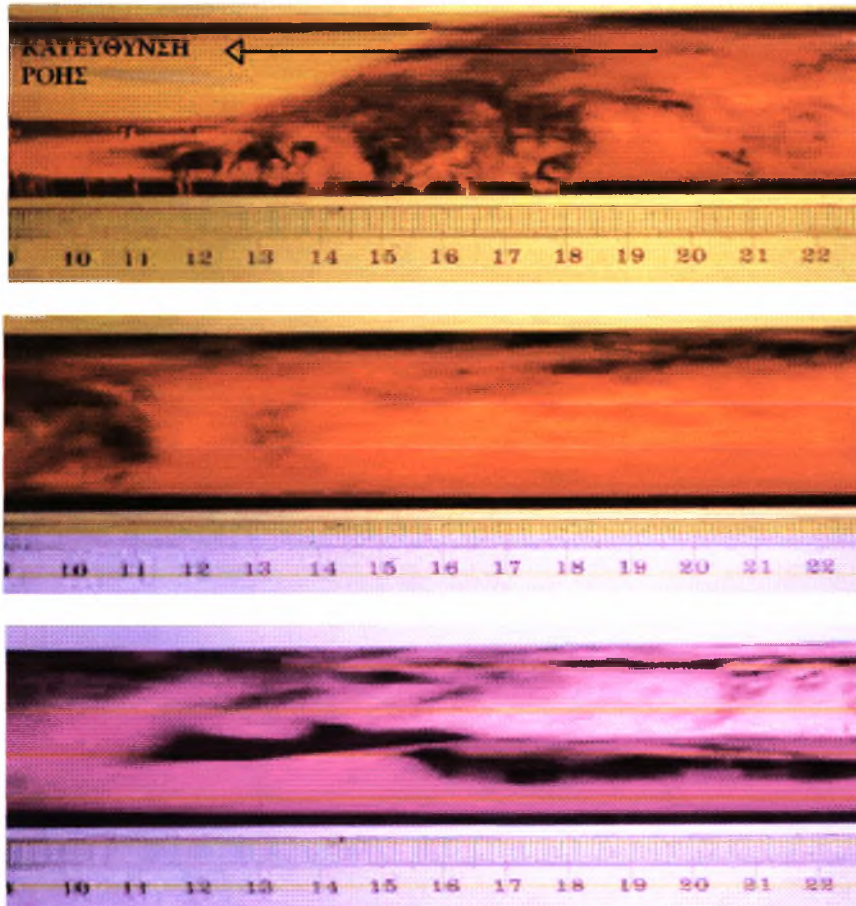
ενώ αν  $0,70 \leq h/D \leq 0,90$  στον αγωγό επικρατεί καθεστώς ψευδο-διαλείπουσας ροής, όπως προκύπτει και από τις οπτικές παρατηρήσεις.

Η ροή με ανηφορική κλίση του αγωγού ευνοεί την ανάπτυξη του καθεστώτος της διαλείπουσας ροής και ελαχιστοποιεί την εμφάνιση της διαστρωματωμένης ροής. Σε χαμηλές ταχύτητες της αέριας φάσης ύστερα από τη διέλευση ενός «slug» και το μερικό «άδειασμα» του αγωγού από υγρό, η μάζα της υγρής φάσης κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση και συγκεντρώνεται στην είσοδο του αγωγού, μέχρι το ύψος της υγρής στιβάδας αυξηθεί τόσο ώστε να δημιουργηθεί ένα νέο «slug». Στο διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών «slugs» επικρατεί η περιοχή διαστρωματωμένης ροής με μέρος της υγρής φάσης να κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση από την αέρια. Η υγρή φάση εξακολουθεί να κινείται αντίθετα μέχρι η ταχύτητα της αέριας φάσης αυξηθεί τόσο ώστε η διάτμηση της να είναι ικανή να αντιστρέψει τη φορά της κίνησης της υγρής φάσης (Simmons και Hanratty, 2001). Εξαιρώντας την περιοχή στην οποία λαμβάνει χώρα αντιστροφή της ροής, η έναρξη της διαλείπουσας ροής μπορεί να προβλεφθεί από την ανάλυση ευστάθειας διαταραχών μεγάλου μήκους των Lin and Hanratty (1986), από την ανάλυση ευστάθειας των Woods and Hanratty (1996) ή από την ανάλυση Kelvin - Helmholtz των Andritsos et al (1989).

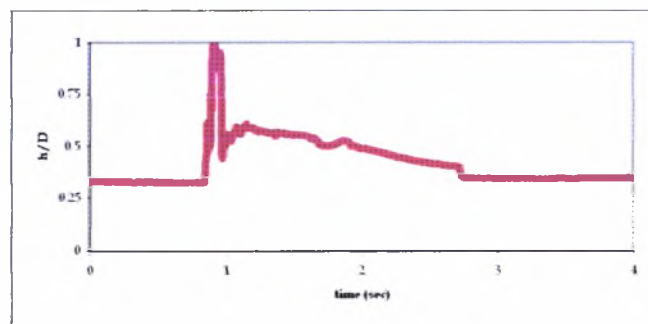
Στο Σχήμα 4-1 παρουσιάζονται φωτογραφίες που απεικονίζουν τη διέλευση ενός «slug» καρέ - καρέ από ένα κομμάτι του αγωγού μήκους περίπου 12 cm για κλίση  $1^\circ$  στους  $15^\circ\text{C}$  και στο Σχήμα 4-2 παρουσιάζεται το αποτύπωμα του «slug» που προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις στις



ιδιες συνθήκες και απεικονίζει το λόγο  $h/D$  ως συνάρτηση του χρόνου. Το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε ως υγρή φάση ήταν διάλυμα γλυκερίνης με ιξώδες 46 cP και πυκνότητα  $1195 \text{ kg/m}^3$  και οι τιμές των φαινομενικών ταχυτήτων της υγρής και της αέριας φάσης ήταν αντίστοιχα  $u_{LS}=0,41 \times 10^{-3} \text{ m/s}$  και  $u_{GS}=1,7 \text{ m/s}$ .

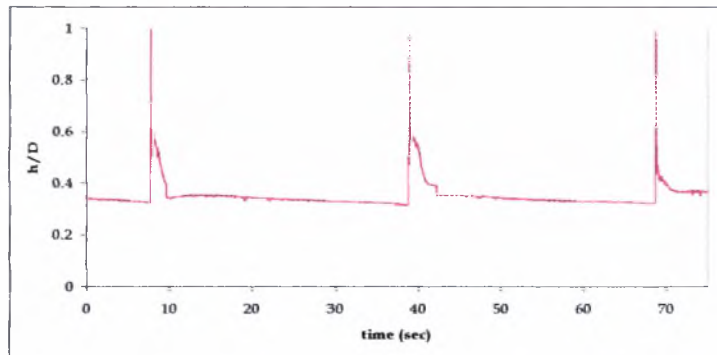


Σχήμα 4-1 Φωτογραφική απεικόνιση ενός «slug» ( $u_{LS}=0,00041 \text{ m/s}$ ,  $u_{GS}=1,7 \text{ m/s}$ ,  $\mu_L=46 \text{ cP}$ ).



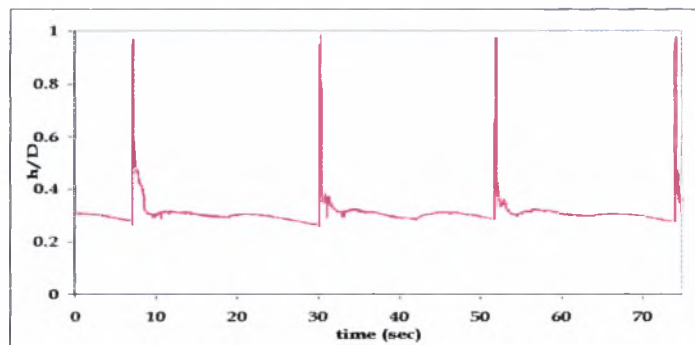
Σχήμα 4-2 Αποτύπωμα ενός «slug» ( $u_{LS}=0,00041 \text{ m/s}$ ,  $u_{GS}=1,7 \text{ m/s}$ ,  $\mu_L=46 \text{ cP}$ ).

Στα Σχήματα 4-3, 4-4 και 4-5 παρουσιάζονται τα αποτυπώματα του καθεστώτος διαλείπουσας ροής για τρεις διαφορετικές τιμές του ιξώδους της υγρής φάσης (46 cP, 14 cP και 1 cP) στη διάρκεια 75 s.



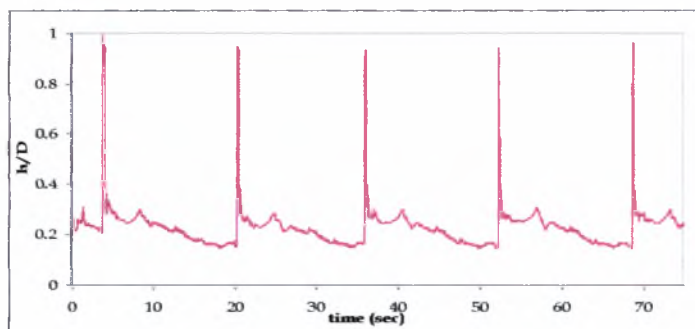
**Σχήμα 4-3** Αποτύπωμα διαλείπουσας ροής για ιξώδες της υγρής φάσης 46 cP

( $u_{LS}=0,41 \times 10^{-3}$  m/s και  $u_{CS}=1,7$  m/s)



**Σχήμα 4-4** Αποτύπωμα διαλείπουσας ροής για ιξώδες της υγρής φάσης 14 cP

( $u_{LS}=0,56 \times 10^{-3}$  m/s και  $u_{CS}=1,7$  m/s)



**Σχήμα 4-5** Αποτύπωμα διαλείπουσας ροής για ιξώδες της υγρής φάσης 1 cP

( $u_{LS}=1,1 \times 10^{-3}$  m/s και  $u_{CS}=1,7$  m/s)

Παρατηρώντας τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης προκαλεί μείωση της συχνότητας διέλευσης των «slugs». Επίσης, διαπιστώνεται ότι η αύξηση του ιξώδους δρα σταθεροποιητικά στη διαλείπουσα ροή καθώς οι κυματισμοί που παρατηρούνται στην υγρή μάζα που έπεται του μετώπου του «slug» (Σχήμα 4-5) εξασθενούν (Σχήμα 4-4) και σχεδόν οβήνουν (Σχήμα 4-3).

Η ψευδο-διαλείπουσα ροή παρατηρείται πάντοτε αμέσως μετά την διαλείπουσα ροή. Χαρακτηρίζεται από τη διέλευση περιοδικών υγρών μαζών («pseudo-slugs») από το σωλήνα, που κινούνται με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα του αερίου, δεν προκαλούν απότομες διαφορές πίεσης και συνεπώς δεν προκαλούν ιδιαίτερα προβλήματα κατά τον βιομηχανικό σχεδιασμό. Το πάχος της υγρής στιβάδας, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι λίγο μικρότερο από την διάμετρο του αγωγού και συνεπώς δεν είναι εύκολος ο οπτικός διαχωρισμός της ροής αυτής από την διαλείπουσα.

Κατά την διαστρωματωμένη ροή το υγρό ρέει στον πυθμένα του αγωγού και το αέριο στο πάνω μέρος και η δημιουργία της επέρχεται για σχετικά μικρές ποσότητες ρευστών. Για χαμηλότερες παροχές της αέριας φάσης, η διεπιφάνεια καλύπτεται από κύματα διδιάστατα (2D).

Στο Σχήμα 4-6 παρουσιάζεται ενδεικτική φωτογραφία που απεικονίζει τη διέλευση 2D κυμάτων από ένα τμήμα του αγωγού σε κλίση 1° μήκους περίπου 10 cm για ιξώδες της υγρής φάσης 46 cP και στο Σχήμα 4-7 παρουσιάζεται το αποτύπωμα που προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις και απεικονίζει το λόγο  $h/D$  στη διάρκεια ενός δευτερολέπτου για τις ίδιες

συνθήκες. Ακολούθως, στα Σχήματα 4-8 και 4-9 παρουσιάζονται τα αποτυπώματα των 2D κυμάτων για δύο επιπλέον τιμές του ιξώδους της υγρής φάσης (14 cP και 1 cP) σε διάρκεια 75 s.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα αυτά συνάγεται ότι η μείωση του ιξώδους της υγρής φάσης προκαλεί αύξηση της συχνότητας διέλευσης των 2D κυμάτων.

Κατά την διαστρωματωμένη ροή και για υψηλότερες παροχές της αέριας φάσης, η διεπιφάνεια καλύπτεται από ακανόνιστα κύματα μεγάλου πλάτους ή κύματα Kelvin – Helmholtz (K – H).

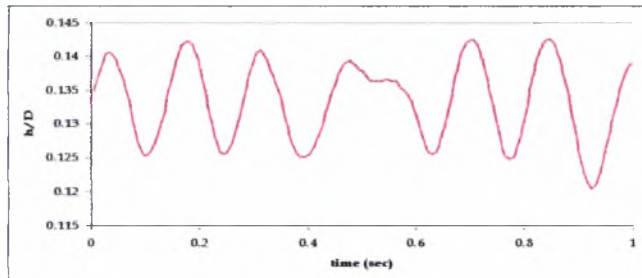
Στη συνέχεια στο Σχήμα 4-10 δίνεται μία ενδεικτική φωτογραφική απεικόνιση της διαστρωματωμένης ροής με κύματα K – H σε ένα τμήμα του αγωγού με κλίση  $1^\circ$  και μήκους περίπου 10 cm για υγρή φάση ιξώδους 46 cP ενώ στο Σχήμα 4-11 παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα που προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις και απεικονίζει το λόγο  $h/D$  στη διάρκεια ενός δευτερολέπτου. Τέλος, στα σχήματα 4-12 και 4-13 παρουσιάζονται τα αποτυπώματα των κυμάτων Kelvin – Helmholtz για δύο επιπλέον τιμές του ιξώδους της υγρής φάσης (14 cP και 1 cP) σε διάρκεια 75 s.

Από τα διαγράμματα των Σχημάτων 4-11, 4-12 και 4-13, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μεταβολή του ιξώδους της υγρής φάσης δεν επηρεάζει ιδιαίτερα τη συχνότητα διέλευσης των κυμάτων Kelvin - Helmholtz.



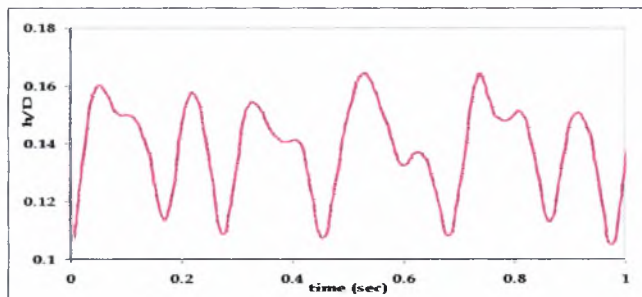
Σχήμα 4-6 Φωτογραφική απεικόνιση κομμάτων 2D για ιξώδες της υγρής φάσης 46 cP

$$(u_{LS}=0,41 \times 10^{-3} \text{ m/s και } u_{CS}=6,5 \text{ m/s})$$



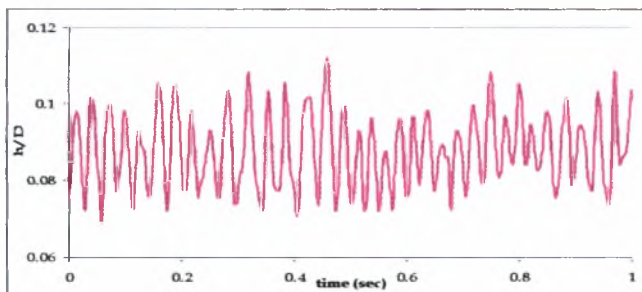
Σχήμα 4-7 Αποτόπωμα κομμάτων 2D για ιξώδες της υγρής φάσης 46 cP

$$(u_{LS}=0,41 \times 10^{-3} \text{ m/s και } u_{CS}=6,5 \text{ m/s})$$



Σχήμα 4-8 Αποτόπωμα κομμάτων 2D για ιξώδες της υγρής φάσης 14 cP

$$(u_{LS}=0,56 \times 10^{-3} \text{ m/s και } u_{CS}=6,5 \text{ m/s})$$

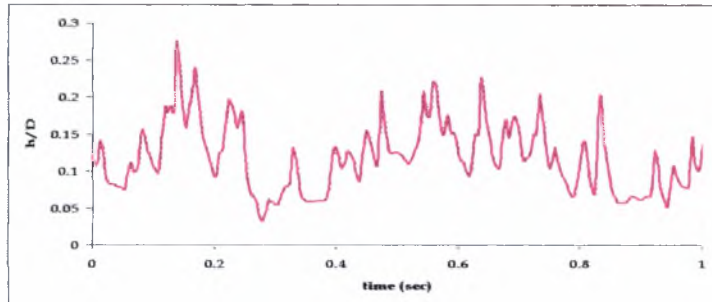


Σχήμα 4-9 Αποτόπωμα κομμάτων 2D για ιξώδες της υγρής φάσης 1 cP

$$(u_{LS}=1,1 \times 10^{-3} \text{ m/s και } u_{CS}=6,5 \text{ m/s})$$

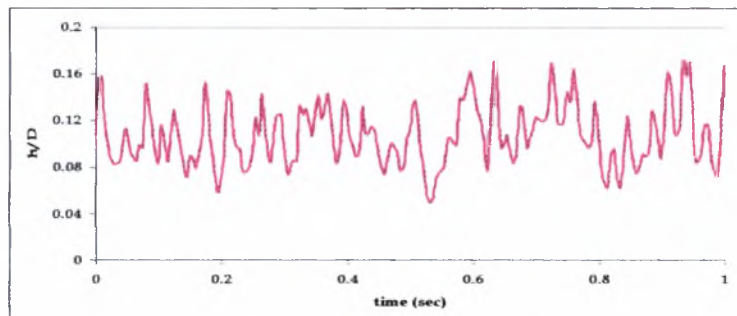


**Σχήμα 4-10** Φωτογραφική απεικόνιση κυμάτων Κ - Η για ιξώδες της υγρής φάσης 46 cP



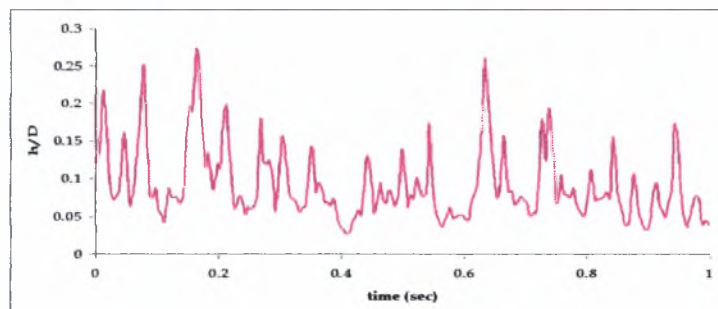
**Σχήμα 4-11** Αποτόπωμα κυμάτων Κ - Η για ιξώδες της υγρής φάσης 46 cP

( $u_{LS}=10,1 \times 10^{-3}$  m/s και  $u_{CS}=13,1$  m/s)



**Σχήμα 4-12** Αποτόπωμα κυμάτων Κ - Η για ιξώδες της υγρής φάσης 14 cP

( $u_{LS}=11,5 \times 10^{-3}$  m/s και  $u_{CS}=11,6$  m/s)



**Σχήμα 4-13** Αποτόπωμα κυμάτων Κ - Η για ιξώδες της υγρής φάσης 1 cP

( $u_{LS}=15,7 \times 10^{-3}$  m/s και  $u_{CS}=11,7$  m/s)

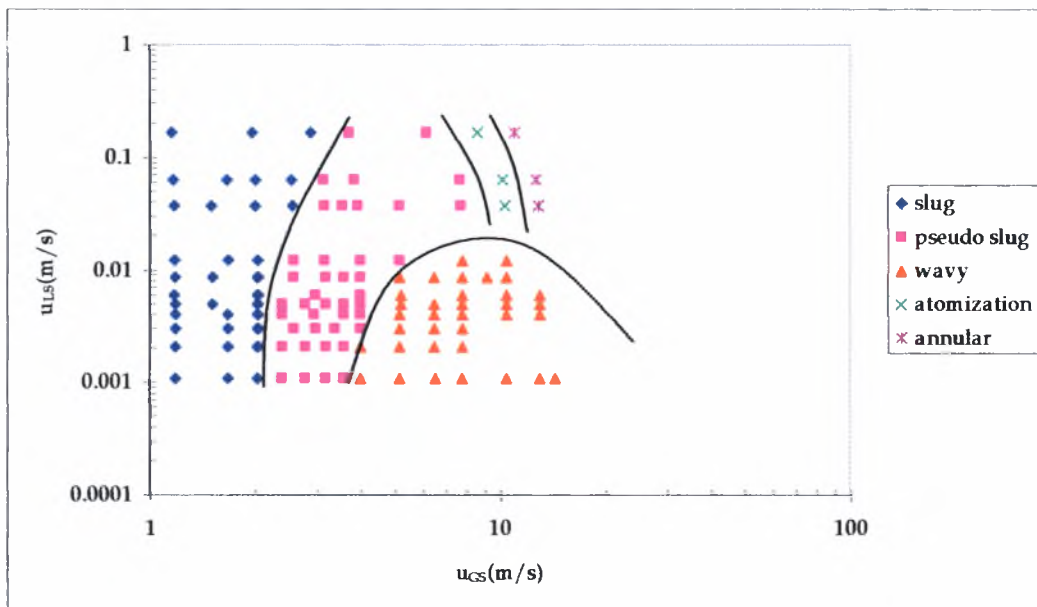
## 4.2 Χάρτες καθεστώτων ροής

Στα Σχήματα 4-14 και 4-15, παρατίθενται οι χάρτες των οπτικών παρατηρήσεων των πειραματικών μετρήσεων για το σύστημα νερού - αέρα σε ροή προς τα πάνω για κλίσεις υπό γωνία  $-0,55^\circ$  και  $-1,00^\circ$ .

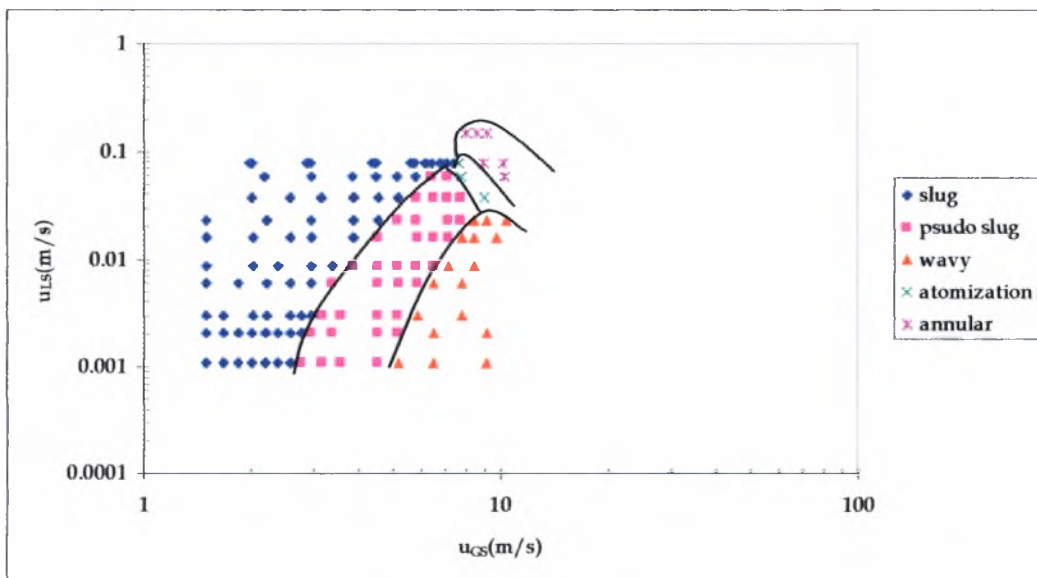
Από τους δύο αυτούς χάρτες είναι προφανές ότι η ανηφορική κλίση του αγωγού ευνοεί τη διαλείπουσα περιοχή ροής γεγονός που συμφωνεί και με τα αποτελέσματα της βιβλιογραφίας (Barnea et al, 1980). (Στο Σχήμα Π5 του Παραρτήματος δίνεται ο χάρτης των καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού - αέρα σε οριζόντιο αγωγό ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση της ροής σε κεκλιμένο αγωγό ανηφορικής κλίσης με τη ροή αυτή). Καθώς αυξάνει η κλίση, παρατηρείται ότι τα όρια μετάπτωσης της ροής από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα και από ψευδο-διαλείπουσα σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα μετατοπίζονται σε αρκετά μεγαλύτερες τιμές της παροχής της αέριας φάσης. Επιπλέον, είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι η κλίση της καμπύλης μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή ελαττώνεται με την αύξηση της γωνίας κλίσης του αγωγού, ήτοι η διαλείπουσα ροή αναπτύσσεται σε μεγαλύτερες παροχές αερίου για μεγαλύτερες γωνίες κλίσης όσο αυξάνεται η παροχή της υγρής φάσης. Η διαστρωματωμένη ροή με κύματα περιορίζεται σε μια μικρή περιοχή με σχήμα καμπάνας, όπως παρατήρησαν και οι Barnea et al.

Στα Σχήματα 4-16 και 4-17 παρατίθενται οι χάρτες των οπτικών παρατηρήσεων των πειραματικών μετρήσεων για το σύστημα διαλύματος

νερού - βουτανόλης - αέρα σε ροή προς τα πάνω για κλίσεις υπό γωνία  $-0,55^\circ$  και  $-1,00^\circ$ .

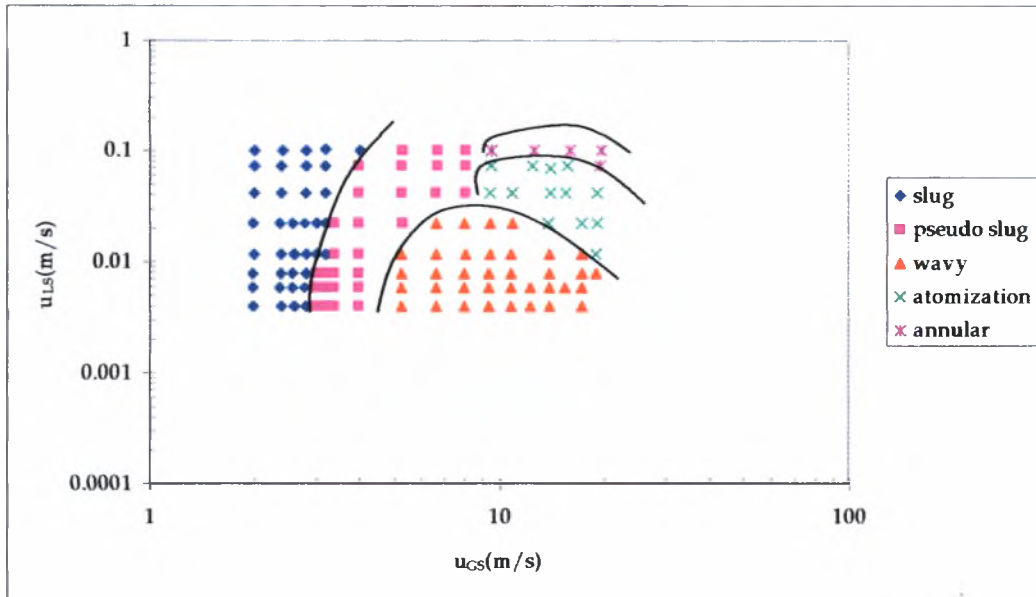


Σχήμα 4-14 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού - αέρα και ανηφορική ροή με κλίση  $-0,55^\circ$

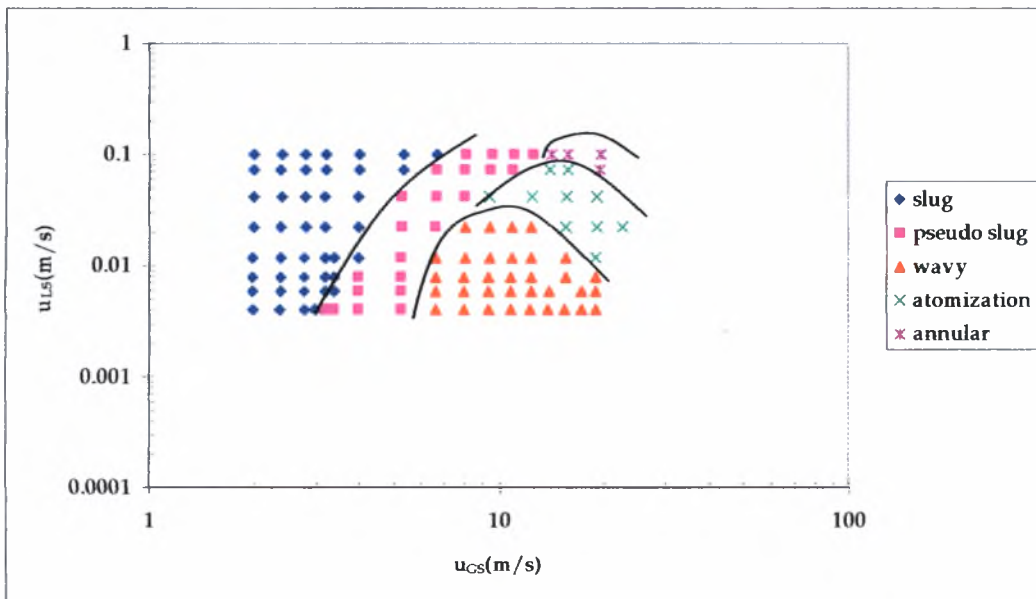


Σχήμα 4-15 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού - αέρα και ανηφορική ροή με κλίση  $-1,00^\circ$





Σχήμα 4-16 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού - βουτανόλης - αέρα και ανηφορική ροή με κλίση - 0,55°



Σχήμα 4-17 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα νερού - βουτανόλης - αέρα και ανηφορική ροή με κλίση - 1,00°

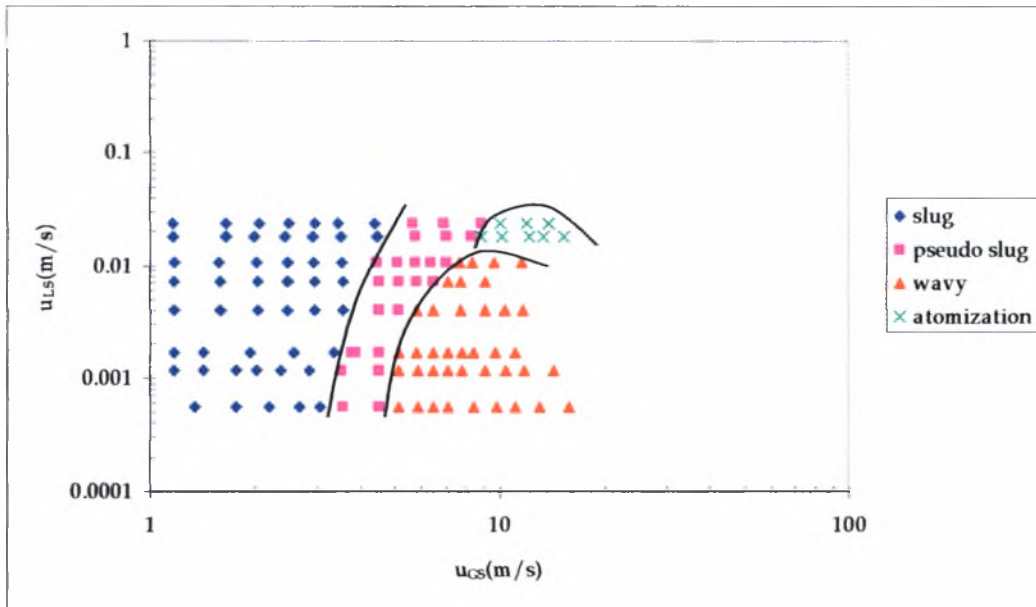
Είναι προφανές ότι ποιοτικά οι χάρτες αυτοί είναι παρόμοιοι με αυτούς που προέκυψαν για το σύστημα νερού - αέρα, ήτοι η αύξηση της

κλίσης του αγωγού ευνοεί τη διεύρυνση της διαλείπουσας περιοχής ροής εις βάρος της ψευδο-διαλείπουσας. Η μετάπτωση σε ψευδο-διαλείπουσα ροή όσο αυξάνεται η παροχή της υγρής φάσης επέρχεται σε μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης για μεγαλύτερη γωνία κλίσης.

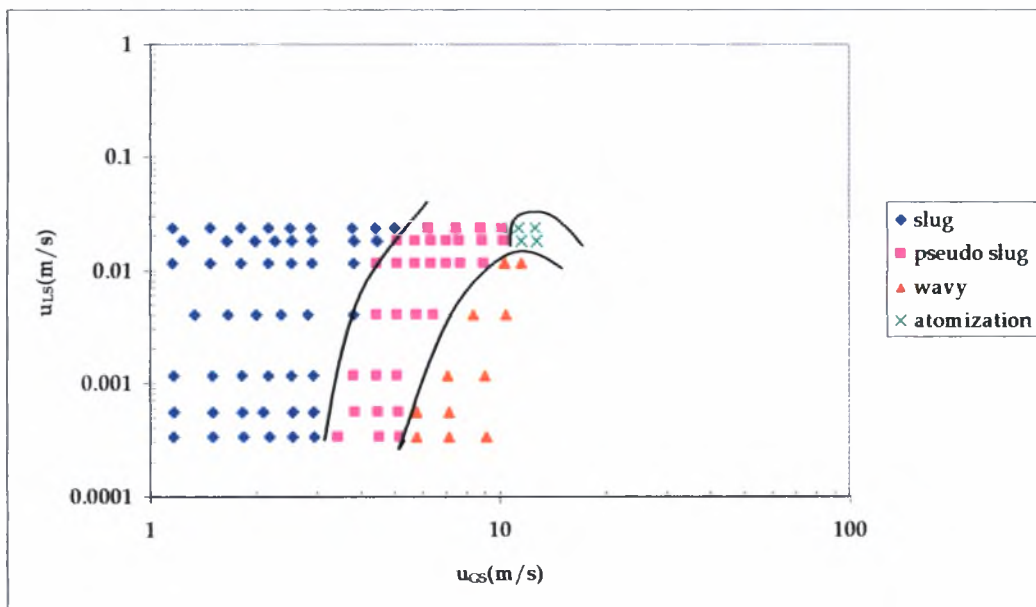
Στα Σχήματα 4-18 και 4-19 παρουσιάζονται οι χάρτες των οπτικών παρατηρήσεων των πειραματικών μετρήσεων για το σύστημα διαλύματος γλυκερίνης - αέρα σε ροή προς τα πάνω για κλίσεις υπό γωνία  $-0,55^\circ$  και  $-1,00^\circ$ . Το διάλυμα γλυκερίνης που χρησιμοποιήθηκε περιείχε γλυκερίνη σε ποσοστό 60% κ.ο., είχε πυκνότητα  $1156 \text{ kg/m}^3$  και ιξώδες 14 cP σε θερμοκρασία  $15^\circ\text{C}$ .

Παρατηρώντας τους χάρτες στα Σχήματα 4-18 και 4-19 προκύπτει το συμπέρασμα ότι για υγρά με σχετικά μεγάλο ιξώδες η επίδραση της κλίσης του αγωγού στη μετάπτωση από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή δεν είναι ιδιαίτερα αισθητή. Παρόλα αυτά η περιοχή όπου επικρατεί η διαλείπουσα ροή είναι αρκετά ευρεία σε σχέση με την αντίστοιχη για το νερό. Η κλίση της καμπύλης μετάπτωσης παραμένει σταθερή και μετατοπίζεται σε ελαφρώς μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης.

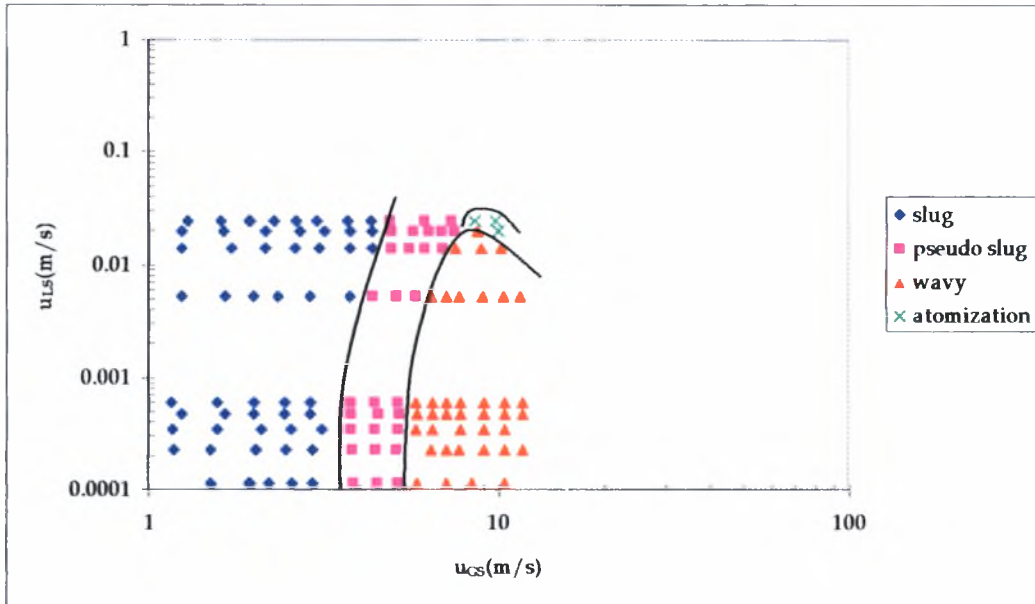
Τέλος, στα Σχήματα 4-20 και 4-21 παρουσιάζονται χάρτες των καθεστώτων ροής για το σύστημα διαλύματος γλυκερίνης - αέρα σε ροή προς τα πάνω για κλίσεις υπό γωνία  $-0,55^\circ$  και  $-1,00^\circ$  αντίστοιχα. Το διάλυμα γλυκερίνης που χρησιμοποιήθηκε περιείχε γλυκερίνη σε ποσοστό 74% κ.ο., η πυκνότητά του ήταν  $1195 \text{ kg/m}^3$  και το ιξώδες του 46 cP στους  $15^\circ\text{C}$ .



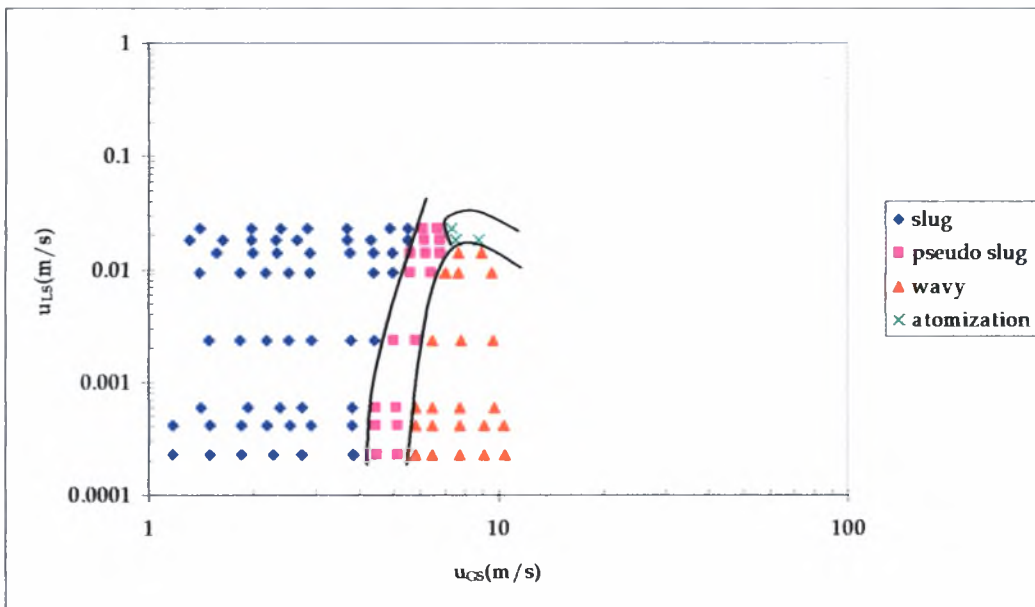
Σχήμα 4-18 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα διαλύματος γλυκερίνης (ιξώδους 14 cP)  
- αέρα και ανηφορική ροή με κλίση  $-0,55^\circ$



Σχήμα 4-19 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα διαλύματος γλυκερίνης (ιξώδους 14 cP)  
- αέρα και ανηφορική ροή με κλίση  $-1,00^\circ$



Σχήμα 4-20 Χάρτης καθεστώτων για το σύστημα διαλύματος γλυκερίνης (ιξώδους 46 cP) – αέρα και ανηφορική ροή με κλίση  $-0,55^\circ$



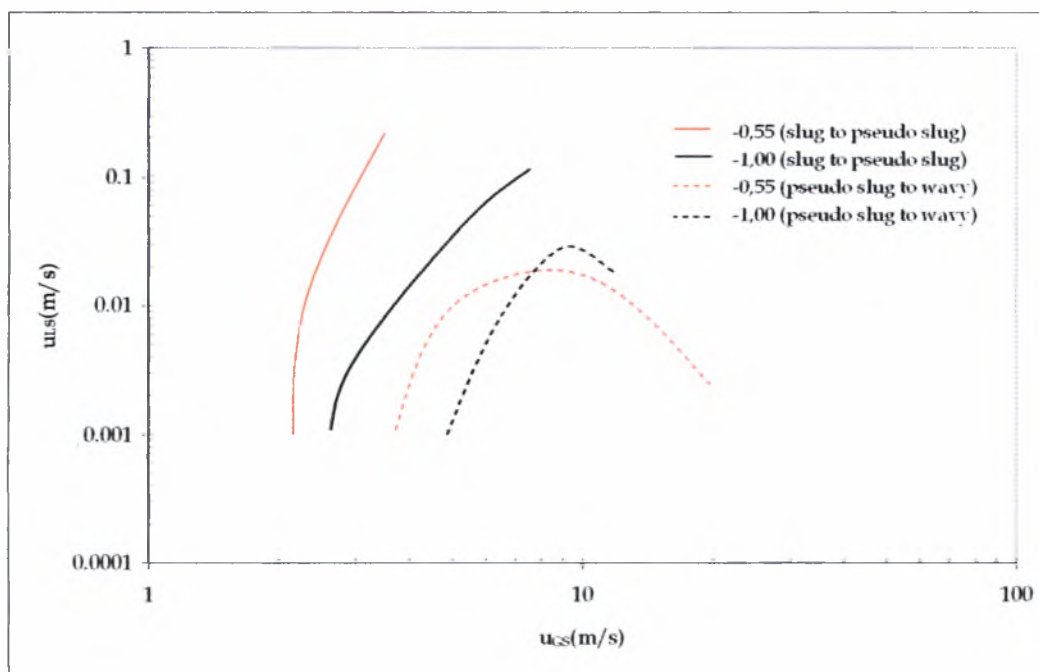
Σχήμα 4-21 Χάρτης καθεστώτων ροής για το σύστημα διαλύματος γλυκερίνης (ιξώδους 46 cP) – αέρα και ανηφορική ροή με κλίση  $-1,00^\circ$

Συγκρίνοντας τους χάρτες στα Σχήματα 4-20 και 4-21 συμπεραίνεται ότι η αύξηση της κλίσης του αγωγού για ρευστά υψηλού ιξώδους διευρύνει

την περιοχή διαλείπουσας ροής εις βάρος της περιοχής ψευδο-διαλείπουσας ροής, ενώ η κλίση της καμπύλης μετάπτωσης παραμένει και σε αυτήν την περίπτωση σχεδόν σταθερή και απλώς μετατοπίζεται σε λίγο μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης.

### 4.3 Επίδραση της κλίσης του αγωγού

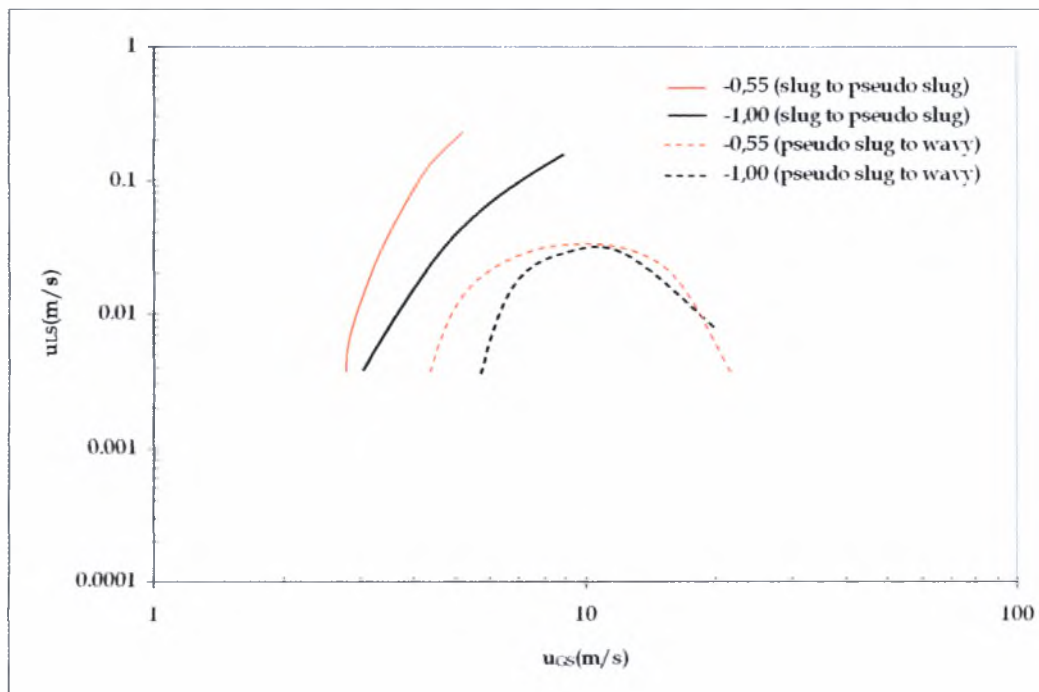
Στο Σχήμα 4-22 απεικονίζονται οι καμπύλες μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και από ψευδοδιαλείπουσα σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα για δύο γωνίες κλίσης.



Σχήμα 4-22 Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα για δύο γωνίες κλίσης για το σύστημα με ιξώδες υγρής φάσης 1 cP.

Στο Σχήμα 4-22 για το σύστημα νερό - αέρας προκύπτει το συμπέρασμα ότι όσο αυξάνεται η κλίση του αγωγού προς τα πάνω, η καμπύλη

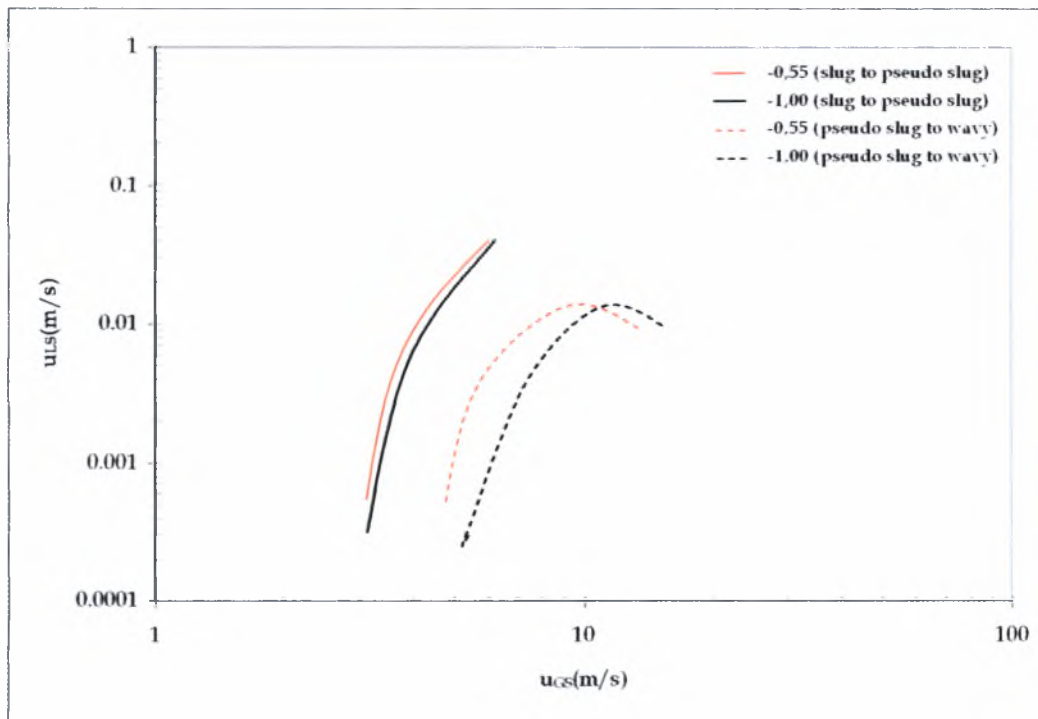
μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή καθώς και η καμπύλη μετάπτωσης από την τελευταία σε ροή με κύματα μετατοπίζονται σε αισθητά μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης. Η κλίση της καμπύλης μετάπτωσης σε ψευδο-διαλείπουσα ροή μειώνεται ενώ η κλίση της καμπύλης μετάπτωσης σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα. Συνεπώς, η διαλείπουσα ροή αναπτύσσεται σε μεγαλύτερες παροχές αερίου και υγρού όσο αυξάνεται η γωνία κλίσης του αγωγού.



**Σχήμα 4-23** Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα για δύο γωνίες κλίσης στο σύστημα νερό - βουτανόλη - αέρας.

Από το Σχήμα 4-23 για το σύστημα νερό - βουτανόλη - αέρας διαπιστώνεται ότι όσο αυξάνεται η κλίση του αγωγού προς τα πάνω, η μετάπτωση από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή καθώς και η

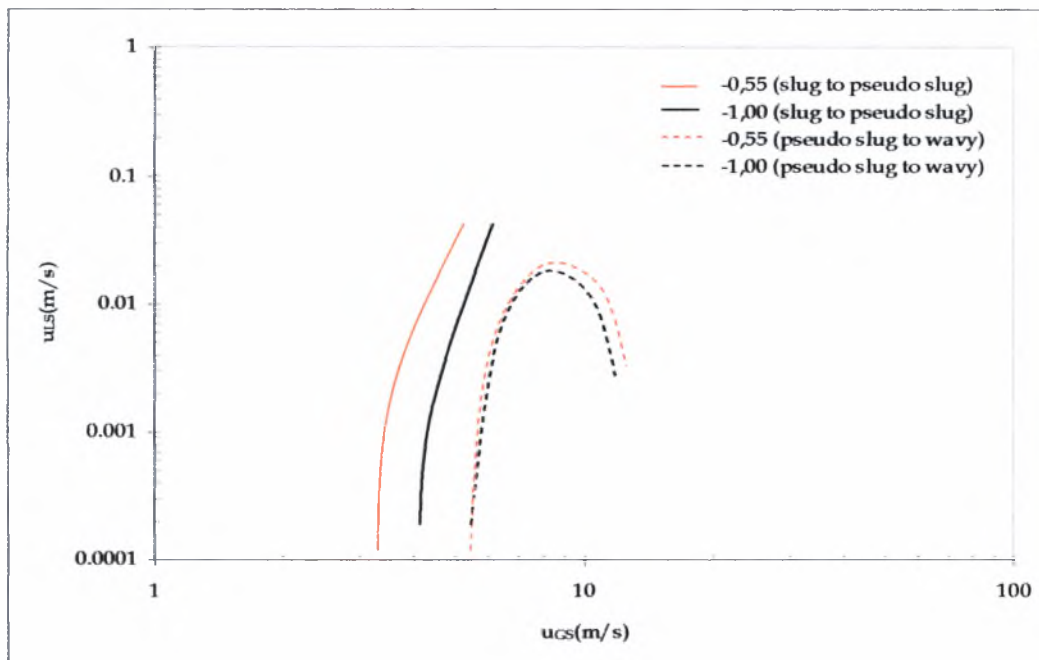
μετάπτωση από ψευδο-διαλείπουσα σε ροή με κύματα λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης. Απαιτούνται δηλαδή μεγαλύτερες τιμές της ταχύτητας του αερίου για να απομακρυνθούμε από την περιοχή διαλείπουσας ροής με την αύξηση της κλίσης του αγωγού.



**Σχήμα 4-24** Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα για δύο γωνίες κλίσης για το σύστημα με ιξώδες υγρής φάσης 14 cP.

Παρατηρώντας το Σχήμα 4-24 για το σύστημα διαλύματος γλυκερίνης ιξώδους 14 cP - αέρας συνάγεται ότι όσο αυξάνεται η κλίση του αγωγού σε ανηφορική ροή, η καμπύλη μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή καθώς και η καμπύλη μετάπτωσης από ψευδο-διαλείπουσα σε ροή με κύματα μετατοπίζονται σε μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης. Ωστόσο, η κλίση της καμπύλης μετάπτωσης σε ψευδο-διαλείπουσα ροή

παραμένει αμετάβλητη, ήτοι οι ταχύτητες υγρής και αέριας φάσης στις οποίες επέρχεται η μετάπτωση ακολουθούν την ίδια καμπύλη λίγο μετατοπισμένη ανεξάρτητα από τις μεταβολές στην κλίση του αγωγού.



**Σχήμα 4-25** Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα για δύο γωνίες κλίσης για το σύστημα με ιξώδες υγρής φάσης 46 cP.

Παρατηρώντας το διάγραμμα του Σχήματος 4-25 για το σύστημα διαλύματος γλυκερίνης ιξώδους 46 cP – αέρας προκύπτει ότι όσο αυξάνεται η κλίση του αγωγού προς τα πάνω, η καμπύλη μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή μετατοπίζεται σε μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης ενώ η καμπύλη μετάπτωσης από ψευδο-διαλείπουσα σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα παραμένει σχεδόν σταθερή. Διαπιστώνεται ότι η κλίση στις καμπύλες μετάπτωσης δεν μεταβάλλεται, δηλαδή οι ταχύτητες μετάπτωσης για την υγρή και την αέρια φάση ακολουθούν την ίδια καμπύλη



λίγο μετατοπισμένη χωρίς να επηρεάζονται από τη μεταβολή της κλίσης του αγωγού.

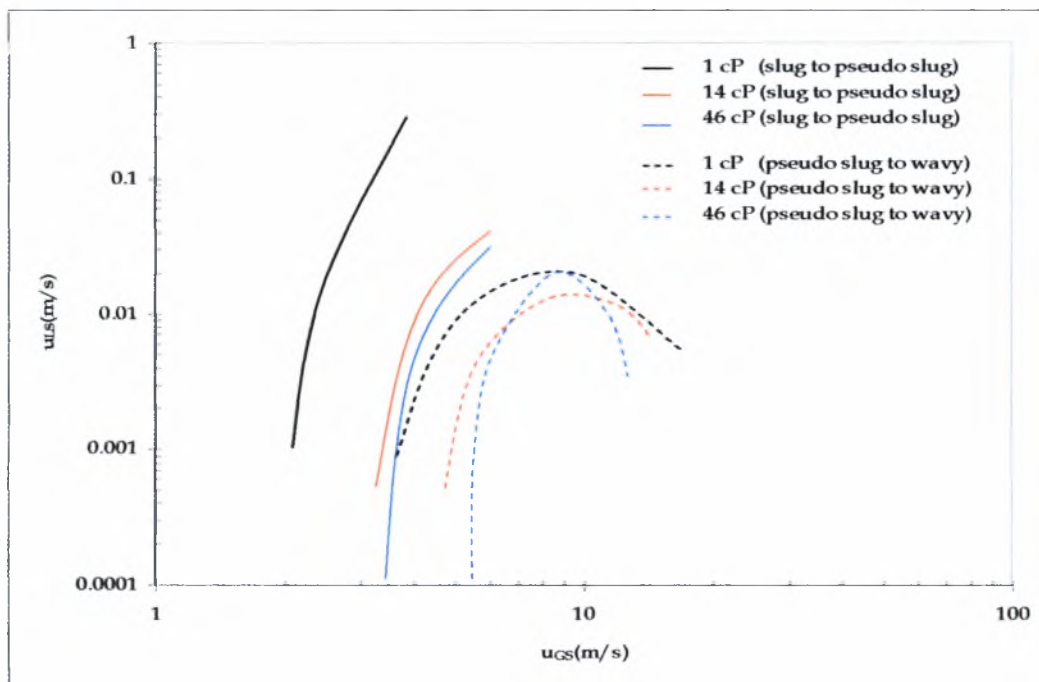
Όλα τα ανωτέρω συμπεράσματα που αφορούν την επίδραση που έχει η κλίση του αγωγού στις μεταπτώσεις στα διάφορα καθεστώτα ροής μπορούν να εξηγηθούν από το γεγονός ότι όσο αυξάνουμε την ανηφορική κλίση του αγωγού, η επίδραση των βαρυτικών δυνάμεων στη μάζα της υγρής φάσης γίνεται ισχυρότερη και ως εκ τούτου απαιτούνται μεγαλύτερες παροχές αερίου ώστε να μεταβληθούν τα καθεστώτα της ροής που επικρατούν στον αγωγό.

#### **4.4 Επίδραση του ιξώδους της υγρής φάσης**

Οι μεταπτώσεις από «slug» σε «pseudo-slug» ροή και από την τελευταία ροή σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα για διάφορες τιμές του ιξώδους της υγρής φάσης, παρουσιάζονται στο Σχήμα 4-26.

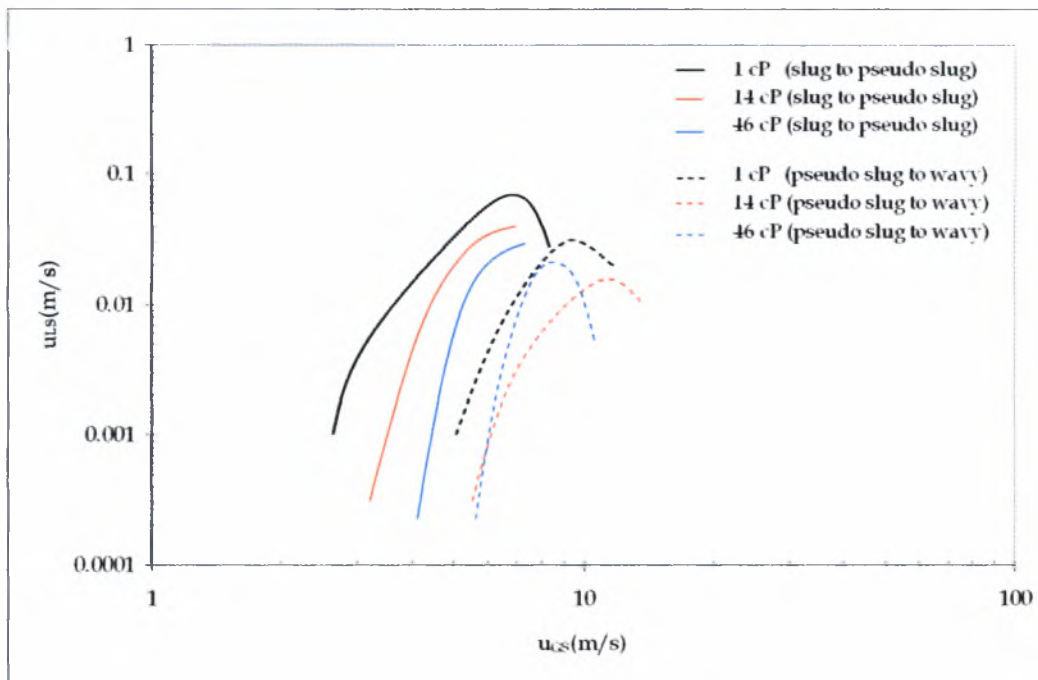
Παρατηρώντας το Σχήμα αυτό συνάγεται ότι με την αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης, η καμπύλη μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή μετατοπίζεται σε πολύ μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης. Η αύξηση δηλαδή του ιξώδους ευνοεί το καθεστώς διαλείπουσας ροής και προκαλεί εμφάνιση του καθεστώτος αυτού σε μεγαλύτερο εύρος τιμών της αέριας φάσης. Επίσης η καμπύλη μετάπτωσης από ψευδο-διαλείπουσα σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα μετατοπίζεται σε λίγο μεγαλύτερες παροχές

της αέριας φάσης αλλά οι μέγιστες τιμές της παροχής της υγρής φάσης στις οποίες εμφανίζεται δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα.



Σχήμα 4-26 Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και μετάπτωσης ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα για συστήματα με ιξώδες 1 cP (νερό - αέρας), 14 cP (γλυκερίνη 60% κ.ο. - αέρας) και 46 cP (γλυκερίνη 74% κ.ο. - αέρας) για ανηφορική ροή με κλίση  $-0,55^\circ$ .

Παρόμοιες είναι οι παρατηρήσεις και για κλίση του αγωγού  $-1,00^\circ$ . Προκύπτει ότι με την αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης, η καμπύλη μετάπτωσης από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και η καμπύλη μετάπτωσης από ψευδο-διαλείπουσα σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα μετατοπίζονται και πάλι σε μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης, ωστόσο η μετατόπιση αυτή δεν είναι τόσο έντονη όσο στη ροή με κλίση  $-0,55^\circ$ .



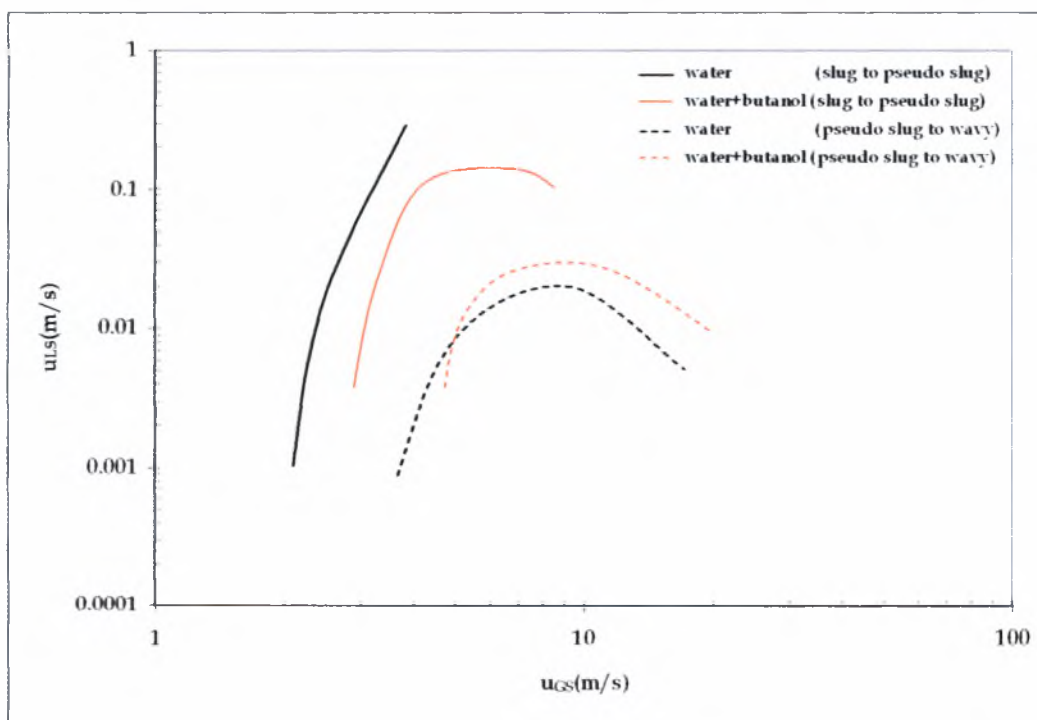
**Σχήμα 4-27** Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κόματα για συστήματα με ιξώδες 1 cP (νερό - αέρας), 14 cP (γλυκερίνη 60% κ.ο. - αέρας) και 46 cP (γλυκερίνη 74% κ.ο. - αέρας) για ανηφορική ροή με κλίση  $-1,00^\circ$ .

Όλα τα ανωτέρω συμπεράσματα που αφορούν την επίδραση του ιξώδους της υγρής φάσης μπορούν να εξηγηθούν εάν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι όσο αυξάνεται το ιξώδες αυξάνονται και οι δυνάμεις τριβής μεταξύ της υγρής και της αέριας φάσης αλλά και μεταξύ της υγρής φάσης και του τοιχώματος του αγωγού. Συνεπώς, όσο μεγαλώνει η τιμή του ιξώδους τόσο μεγαλύτερη είναι η παροχή του αερίου που απαιτείται για να υπερνικήσει τις δυνάμεις τριβής που αντιτίθενται στην κίνηση της αέριας φάσης μέσα στον αγωγό.

Συγκρίνοντας τα δύο παραπάνω γραφήματα, συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται η κλίση του αγωγού σε ανηφορική ροή, η αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης επιδρά λιγότερο έντονα στις καμπύλες μετάπτωσης.

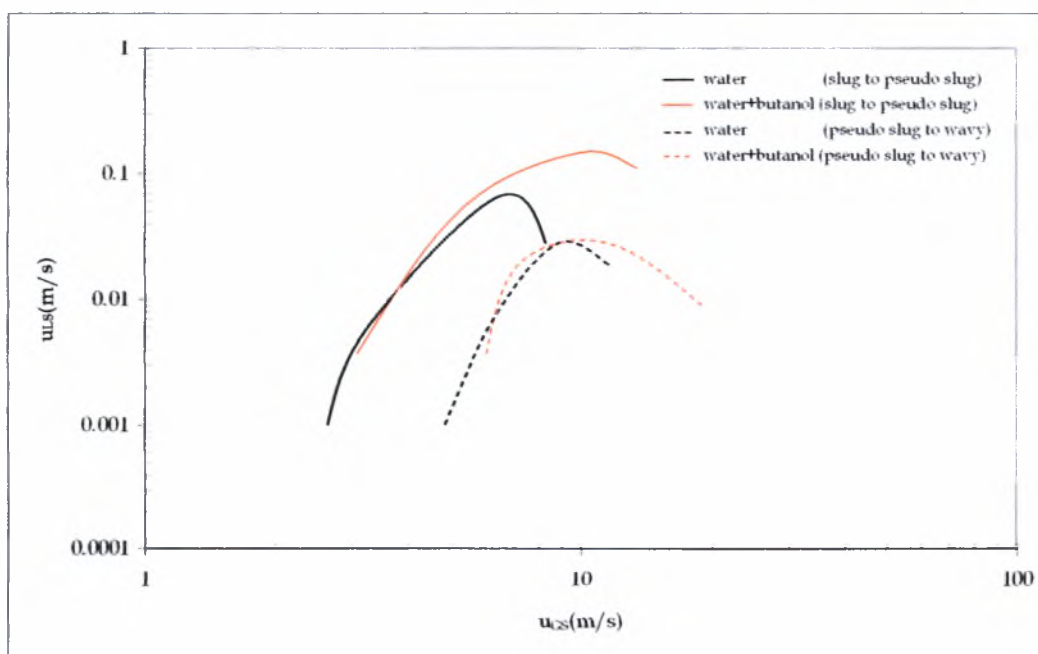
#### 4.5 Επίδραση της επιφανειακής τάσης της υγρής φάσης

Στη συνέχεια παρατίθεται το διάγραμμα που αναπαριστά τις καμπύλες μετάπτωσης από «slug» σε «pseudo-slug» ροή και από την τελευταία στη διαστρωματωμένη ροή με κύματα για διάφορες τιμές της επιφανειακής τάσης (Σχήμα 4-28).



**Σχήμα 4-28** Καμπύλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και μετάπτωσης ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα για το σύστημα νερό - αέρας και υδατικό διάλυμα βουτανόλης - αέρας σε ανηφορική ροή με κλίση  $-0,55^\circ$ .

Εξετάζοντας το γράφημα του Σχήματος 4-28 για το σύστημα υδατικό διάλυμα βουτανόλης – αέρας και ανηφορική ροή με κλίση του αγωγού  $-0,55^\circ$ , προκύπτει ότι με τη μείωση της επιφανειακής τάσης του υγρού, η μετάπτωση από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή καθώς και η μετάπτωση από την τελευταία σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα λαμβάνουν χώρα σε εμφανώς μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης. Για υγρά λοιπόν με χαμηλότερη επιφανειακή τάση η μετάπτωση στα καθεστώτα αυτά επέρχεται δυσκολότερα, καθώς η μείωση της επιφανειακής τάσης της υγρής φάσης δρα σταθεροποιητικά στη ροή. Διαπιστώνεται επίσης μία αύξηση στις παροχές της υγρής φάσης όπου λαμβάνει χώρα η μετάπτωση από ψευδο-διαλείπουσα σε διαστρωματωμένη ροή με κύματα.



Σχήμα 4-29 Καμπόλες μετάπτωσης ανάμεσα σε διαλείπουσα και ψευδο-διαλείπουσα ροή και μετάπτωσης ανάμεσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή και ροή με κύματα για το σύστημα νερό – αέρας και υδατικό διάλυμα βουτανόλης - αέρας σε ανηφορική ροή με κλίση  $-1,00^\circ$ .

Ομοίως, παρατηρώντας τις καμπύλες που απεικονίζονται στο γράφημα του Σχήματος 4-29 διαπιστώνεται ότι όσο μειώνεται η επιφανειακή τάση της υγρής φάσης, η μετάπτωση από διαλείπουσα σε ψευδο-διαλείπουσα ροή καθώς και η μετάπτωση από ψευδο-διαλείπουσα σε ροή με κύματα λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης αλλά όχι τόσο μεγαλύτερες όσο στη ροή με κλίση  $-0,55^\circ$ .

Καθώς η επιφανειακή τάση είναι η ενέργεια που απαιτείται για να αυξηθεί η επιφάνεια ενός υγρού ανά μονάδα επιφάνειας, εύκολα διαπιστώνεται ότι με μείωση της ενέργειας αυτής η διεπιφάνεια των δύο ρευστών στον αγωγό θα υφίσταται λιγότερες δυνάμεις, συνεπώς θα είναι περισσότερο ομαλή και επομένως θα απαιτούνται μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης για να προκαλέσουν διαταραχές.

Λαμβάνοντας υπόψη τα δύο παραπάνω διαγράμματα, συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται η κλίση του αγωγού σε ανηφορική ροή, η μεταβολή της επιφανειακής τάσης της υγρής φάσης επιδρά λιγότερο έντονα στις καμπύλες μετάπτωσης.

## Κεφάλαιο 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής εργασίας. Αντικείμενο της μελέτης ήταν η διφασική ροή υγρού – αερίου σε κεκλιμένο αγωγό με ανηφορική κλίση, ενώ κύριος στόχος ήταν η μελέτη της επίδρασης της κλίσης του αγωγού καθώς και των φυσικών ιδιοτήτων της υγρής φάσης στην μετάπτωση στα διάφορα καθεστάτα της ροής που αναπτύσσονται στο εσωτερικό του αγωγού.

### 5.1 Συμπεράσματα

Από την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία συνάχθηκαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η αύξηση της γωνίας κλίσης του αγωγού σε ανηφορική ροή ευνοεί την ανάπτυξη διαλείπουσας ροής («slug» flow) εις βάρος της ψευδο-διαλείπουσας («pseudo-slug» flow) και της διαστρωματωμένης ροής με κύματα (stratified wavy flow), γεγονός που έρχεται σε συμφωνία με τα αποτελέσματα των Barnea et al. (1980).
- Η αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης έχει σταθεροποιητική επίδραση στην διαλείπουσα και την διαστρωματωμένη ροή με

διδιάστατα κύματα (2D), ενώ δεν επιδρά ιδιαίτερα στην διαστρωματωμένη ροή με κύματα Kelvin – Helmholtz (K – H).

- Η αύξηση του ιξώδους της υγρής φάσης ευνοεί την ανάπτυξη της διαλείπουσας ροής σε μεγαλύτερες παροχές της αέριας φάσης. Ωστόσο, η επίδραση της αύξησης του ιξώδους γίνεται λιγότερο αισθητή με την αύξηση της κλίσης του αγωγού.
- Η μείωση της επιφανειακής τάσης της υγρής φάσης προκαλεί αύξηση του εύρους των παροχών της αέριας φάσης στις οποίες αναπτύσσεται η διαλείπουσα ροή αλλά και η διαστρωματωμένη ροή με κύματα. Μολαταύτα, όσο αυξάνεται η κλίση του αγωγού προς τα πάνω, η αύξηση αυτή γίνεται λιγότερο έντονη.

## 5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Αν και οι πειραματικές μετρήσεις ήταν αρκετά εκτενείς, υπάρχουν ορισμένα σημεία που θα μπορούσαν να διερευνηθούν σε μεγαλύτερο βαθμό.

- Ενδιαφέρουσα θα ήταν η συστηματικότερη πειραματική μελέτη των κυμάτων που δημιουργούνται στη διεπιφάνεια κατά τη διαστρωματωμένη ροή. Η μελέτη της επίδρασης των φυσικών ιδιοτήτων του συστήματος και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του αγωγού στη δημιουργία των κυμάτων θα μπορούσε να δώσει πολύτιμες πληροφορίες για την κατανόηση του φαινομένου αυτού.
- Μελέτη θα μπορούσε ακόμα να πραγματοποιηθεί για την εύρεση αντικειμενικής μεθόδου για την ταυτοποίηση των καθεστώτων ροής. Μέχρι τώρα η ταυτοποίηση



αυτή πραγματοποιείται με κυρίως με οπτικές παρατηρήσεις, οι οποίες είναι υποκειμενικές. Η ανάπτυξη μιας τέτοιας μεθόδου θα αποτελέσει πολύ σημαντικό εργαλείο για τη σωστή μελέτη της διφασικής ροής.

- Τέλος, πειραματικές τιμές μεγεθών όπως η πτώση πίεσης κατά μήκος του αγωγού και η τοπική τιμή της διατμητικής τάσης στη διεπιφάνεια υγρής φάσης-τοιχώματος μπορούν να βοηθήσουν ιδιαίτερα στη μελέτη και την κατανόηση της διφασικής ροής.

## Βιβλιογραφία

- Andreussi, P. and Bendiksen, K.  
'*An Investigation of Void Fraction in Liquid Slugs for Horizontal and Inclined Gas-Liquid Pipe Flow*'  
Int. J. Multiphase Flow, Vol 15, pp 937-946, 1989
- Andreussi, P. and Persen, L.N.  
'*Stratified Gas-Liquid Flow in Downwardly Inclined Pipes*'  
Int. J. Multiphase Flow, Vol 13, pp 565-575, 1987
- Andritsos, N.  
'*Effect of pipe Diameter and Liquid Viscosity on Horizontal Stratified Flow*'  
PhD Thesis, University of Illinois, Urbana, 1986
- Andritsos, N. and Hanratty, T.J.  
'*Interfacial Instabilities for Horizontal Gas-Liquid Flows in Pipelines*'  
Int. J. Multiphase Flow, Vol 13, pp 583-603, 1987b
- Andritsos, N., Williams, L. and Hanratty, T.J.  
'*Effect of Liquid Viscosity on the Stratified-Slug Transition in Horizontal Pipe Flow*'  
Int. J. Multiphase Flow, Vol 15, pp 877-892, 1989
- Baker, O.  
'*Simultaneous Flow of Oil and Gas*'  
Oil and Gas Journal, Vol 53, pp 185-195, 1954
- Barnea, D.  
'*On the Effect of Viscosity on Stability of Stratified Gas-Liquid Flow-Application to Flow Pattern Transition at Various Pipe Inclinations*'  
Chem. Engineering Science, Vol 46, pp 2123-2131, 1991
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E.  
'*Flow Pattern Transition for Downward Inclined Two Phase Flow: Horizontal to Vertical*'  
Chem. Engineering Science, Vol 5, pp 735-740, 1982
- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E.  
'*Flow Pattern Transition for Gas-Liquid Flow in Horizontal and Inclined Pipes*'  
Int. J. Multiphase Flow, Vol 6, pp 217-225, 1980

- Barnea, D., Shoham, O., Taitel, Y. and Dukler, A.E.  
'Gas-Liquid Flow in Inclined Tubes: Flow pattern Transitions for Upward Flow'  
Chem. Engineering Science, Vol 40, pp 131-136, 1985
- Beggs, H.D. and Brill, J.P.  
'A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes'  
J. of Petroleum Technology, Vol 25, pp 607-617, 1973
- Brauner, N. and Maron, M.  
'Analysis of Stratified/Non Stratified Transitional Boundaries in Inclined Gas-Liquid Flows'  
Int. J. Multiphase Flow, Vol 18, pp 541-557, 1992
- Fan, Z., Lusseyran, F. and Hanratty, T.J.  
'Initiation of Slugs in Horizontal Gas-Liquid Flows'  
AIChE Journal, Vol 39, pp 1741-1753, 1993
- Funada, T. and Joseph, D.D.  
'Viscous Potential Flow Analysis of Kelvin-Helmholtz Instability in a Channel'  
J. Fluid Mech. Vol 445, pp 263-283, 2001
- Grolman, E. and Fortuin, M.H.  
'Gas-Liquid Flow in Slightly Inclined Pipes'  
Chem. Eng. Science, Vol 52, pp 4461-4471, 1997
- Grolman, E., Commandeur, N.C.J., de Baat, E.C. and Fortuin, J.M.H.  
'Wavy-to-slug Flow Transition in Slightly Inclined Gas-Liquid Pipe Flow'  
AIChE Journal, Vol 42, pp 901-909, 1996
- Hanratty, T.J. and Hershman, A.  
'Initiation Of Roll Waves'  
AIChE Journal, Vol 7, pp 488-497, 1961
- Jayawardena, S.S., Balakotaiah, V. and Witte, L.  
'Flow Pattern Transition Maps for Microgravity Two-Phase Flows'  
AIChE Journal, Vol 43, pp 1637-1640, 1997
- Kokal, S.L. and Stanislav, J.F.  
'An Experimental Study of Two-Phase Flow Patterns in Slightly Inclined Pipes-I. Flow Patterns'  
Chem. Eng. Science, Vol 44, pp 665-679, 1989
- Kokal, S.L. and Stanislav, J.F.  
'An Experimental Study of Two-Phase Flow Patterns in Slightly Inclined Pipes-II. Liquid Holdup and Pressure Drop'  
Chem. Eng. Science, Vol 44, pp 681-693, 1989
- Kordyban, E.S.  
'Some Details of Developing Slugs in Horizontal Two-Phase Flow'  
AIChE Journal, Vol 31, pp 802-806, 1985

- Kordyban, E.S. and Ranov, T.  
'Mechanism of Slug Formation in Horizontal Two-Phase Flow'  
Journal of Basic Engineering, pp 857-864, December 1970
- Lin, P.Y. and Hanratty, T.J .  
'Prediction of the Initiation of Slugs with Linear Stability Theory'  
Int. J. Multiphase Flow, Vol 12, pp 79-98, 1986
- Lioumbas, J.S., Paras, S.V. and Karabelas, A.J.  
'Co-Current Stratified Gas-Liquid Downflow-Influence of the Liquid Flow Field on Interfacial Structure'  
Int. J. Multiphase Flow, Vol 31, pp 869-896, 2005
- Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C.  
'Proposed Correlation of Data for Isothermal Two-Phase, Two-Component Flow in pipes'  
Chem. Eng. Prog.,Vol. 45, pp 39-48,1949
- Mandhane, J.M., Gregory, G.A. and Aziz, K.  
'A Flow Pattern Map for Gas-Liquid in Horizontal Pipes'  
Int. J. Multiphase Flow, Vol 1, pp 537-553, 1974
- Mishima, K. and Ishii, M.  
'Theoretical Prediction of Onset of Horizontal Slug Flow'  
Journal of Fluids Engineering, Vol 102, pp 441-445, 1980
- Newton, C.H., Behnia, M. and Reizes, J.A.  
'The Effect of Liquid Viscosity on Gas Wall and Interfacial Shear Stress in Horizontal Two-Phase Pipe Flow'  
Chem. Eng. Science.,Vol. 54, pp 1071-1079,1999
- Simmons, M.J.H. and Hanratty, T.J.  
'Transition from Stratified to Intermittent Flows in Small Angle Upflows'  
Int. J. Multiphase Flow, Vol 27, pp 599-616, 2001
- Taitel, Y. and Dukler, A.E.  
'A Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow'  
AIChE Journal, Vol 22, pp 47-55, 1976
- Taitel, Y., Barnea, D. and Dukler, A.E.  
'Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tube'  
AIChE Journal, Vol 26, pp 345-354, 1980
- Wallis, G.,B.  
'One Dimensional two-phase flow'  
McGraw-Hill, New York 1969
- Wallis, G.B. and Dodson, J.E.  
'The Onset of Slugging in Horizontal Stratified Air-Water Flow'

Int. J. Multiphase Flow, Vol 1, pp 173-193, 1973

Weisman, J., Duncan, D., Gibson, J. and Crawford, T.

'Effects of Fluids Properties and Pipe Diameter on Two-Phase Flow Patterns in Horizontal Lines'

Int. J. Multiphase Flow, Vol 5, pp 437-462, 1979

Woods, B.D., Hurlburt, E.T. and Hanratty, T.J.

'Mechanism of Slug Formation in Downwardly Inclined Pipes'

Int. J. Multiphase Flow, Vol. 26, pp 997-998, 2000

Wu, H.L., Pots, B.F.M., Hollenberg, J.F. and Meerhoff, R.

'Flow Pattern Transitions in Two-Phase Gas/Condensate Flow at High Pressure in a 8-inch Horizontal Pipe'

Conference of Multiphase Flow, pp 13-21, The Hague, Netherlands, May 1987

Λιούμπας, Ι.Σ..

'Μελέτη της Διαχωρισμένης Ομορροής Υγρού-Αερίου σε Ελαφρά Κεκλιμένους Αγωγούς'

Διδακτορική Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2006

Τζώτζη, Χ.

'Μοντελοποίηση της Διεπιφανειακής Διατμητικής Τάσης Κατά την Οριζόντια Διαστρωματωμένη Ροή Υγρού-Αερίου'

Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 2007

# Παράρτημα

## ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΕΡΟΥ

Temperature	Pressure	Sat vapor pressure	Density	Specific enthalpy of liquid water		Specific heat		Volume heat capacity	Dynamic viscosity
				kJ/kg	kcal/kg	kJ/kg	kcal/kg		
°C	Pa	Pa	kg/m <sup>3</sup>	kJ/kg	kcal/kg	kJ/kg	kcal/kg	kJ/m <sup>3</sup>	kg/m.s
0	101325	611	999.82	0.06	0.01	4.217	1.007	4216.1	0.001792
1	101325	657	999.89	4.28	1.02	4.213	1.006	4213.03	0.001731
2	101325	705	999.94	8.49	2.03	4.21	1.006	4210.12	0.001674
3	101325	757	999.98	12.7	3.03	4.207	1.005	4207.36	0.00162
4	101325	813	1000	16.9	4.04	4.205	1.004	4204.74	0.001569
5	101325	872	1000	21.11	5.04	4.202	1.004	4202.26	0.00152
6	101325	935	999.99	25.31	6.04	4.2	1.003	4199.89	0.001473
7	101325	1001	999.96	29.51	7.05	4.198	1.003	4197.63	0.001429
8	101325	1072	999.91	33.7	8.05	4.196	1.002	4195.47	0.001386
9	101325	1147	999.85	37.9	9.05	4.194	1.002	4193.4	0.001346
10	101325	1227	999.77	42.09	10.05	4.192	1.001	4191.42	0.001308
11	101325	1312	999.68	46.28	11.05	4.191	1.001	4189.51	0.001271
12	101325	1402	999.58	50.47	12.06	4.189	1.001	4187.67	0.001236
13	101325	1497	999.46	54.66	13.06	4.188	1	4185.89	0.001202
14	101325	1597	999.33	58.85	14.06	4.187	1	4184.16	0.00117
15	101325	1704	999.19	63.04	15.06	4.186	1	4182.49	0.001139
16	101325	1817	999.03	67.22	16.06	4.185	1	4180.86	0.001109
17	101325	1936	998.86	71.41	17.06	4.184	0.999	4179.27	0.001081
18	101325	2063	998.68	75.59	18.05	4.183	0.999	4177.72	0.001054
19	101325	2196	998.49	79.77	19.05	4.182	0.999	4176.2	0.001028
20	101325	2337	998.29	83.95	20.05	4.182	0.999	4174.7	0.001003
21	101325	2486	998.08	88.14	21.05	4.181	0.999	4173.23	0.000979
22	101325	2642	997.86	92.32	22.05	4.181	0.999	4171.78	0.000955
23	101325	2808	997.62	96.5	23.05	4.18	0.998	4170.34	0.000933
24	101325	2982	997.38	100.68	24.05	4.18	0.998	4168.92	0.000911
25	101325	3166	997.13	104.86	25.04	4.18	0.998	4167.51	0.000891
26	101325	3360	996.86	109.04	26.04	4.179	0.998	4166.11	0.000871
27	101325	3564	996.59	113.22	27.04	4.179	0.998	4164.71	0.000852
28	101325	3779	996.31	117.39	28.04	4.179	0.998	4163.31	0.000833
29	101325	4004	996.02	121.57	29.04	4.179	0.998	4161.92	0.000815
30	101325	4242	995.71	125.75	30.04	4.178	0.998	4160.53	0.000798
31	101325	4491	995.41	129.93	31.03	4.178	0.998	4159.13	0.000781
32	101325	4754	995.09	134.11	32.03	4.178	0.998	4157.73	0.000765
33	101325	5029	994.76	138.29	33.03	4.178	0.998	4156.33	0.000749
34	101325	5318	994.43	142.47	34.03	4.178	0.998	4154.92	0.000734
35	101325	5622	994.08	146.64	35.03	4.178	0.998	4153.51	0.00072

36	101325	5940	993.73	150.82	36.02	4.178	0.998	4152.08	0.000705
37	101325	6274	993.37	155	37.02	4.178	0.998	4150.65	0.000692
38	101325	6624	993	159.18	38.02	4.178	0.998	4149.2	0.000678
39	101325	6991	992.63	163.36	39.02	4.179	0.998	4147.74	0.000666
40	101325	7375	992.25	167.54	40.02	4.179	0.998	4146.28	0.000653
41	101325	7777	991.86	171.71	41.01	4.179	0.998	4144.8	0.000641
42	101325	8198	991.46	175.89	42.01	4.179	0.998	4143.3	0.000629
43	101325	8639	991.05	180.07	43.01	4.179	0.998	4141.8	0.000618
44	101325	9100	990.64	184.25	44.01	4.179	0.998	4140.28	0.000607
45	101325	9582	990.22	188.43	45.01	4.18	0.998	4138.75	0.000596
46	101325	10085	989.8	192.61	46	4.18	0.998	4137.2	0.000586
47	101325	10612	989.36	196.79	47	4.18	0.998	4135.64	0.000576
48	101325	11161	988.92	200.97	48	4.18	0.998	4134.06	0.000566
49	101325	11735	988.47	205.15	49	4.181	0.999	4132.47	0.000556
50	101325	12335	988.02	209.33	50	4.181	0.999	4130.87	0.000547
51	101325	12960	987.56	213.51	51	4.181	0.999	4129.25	0.000538
52	101325	13612	987.09	217.69	52	4.182	0.999	4127.61	0.000529
53	101325	14292	986.62	221.88	52.99	4.182	0.999	4125.97	0.000521
54	101325	15001	986.14	226.06	53.99	4.182	0.999	4124.3	0.000512
55	101325	15740	985.65	230.24	54.99	4.183	0.999	4122.63	0.000504
56	101325	16510	985.16	234.42	55.99	4.183	0.999	4120.94	0.000496
57	101325	17312	984.66	238.61	56.99	4.183	0.999	4119.24	0.000489
58	101325	18146	984.16	242.79	57.99	4.184	0.999	4117.52	0.000481
59	101325	19015	983.64	246.97	58.99	4.184	0.999	4115.79	0.000474
60	101325	19919	983.13	251.16	59.99	4.185	0.999	4114.05	0.000467
61	101325	20859	982.6	255.34	60.99	4.185	1	4112.3	0.00046
62	101325	21837	982.07	259.53	61.99	4.186	1	4110.53	0.000453
63	101325	22854	981.54	263.72	62.99	4.186	1	4108.75	0.000447
64	101325	23910	981	267.9	63.99	4.187	1	4106.97	0.00044
65	101325	25008	980.45	272.09	64.99	4.187	1	4105.17	0.000434
66	101325	26148	979.9	276.28	65.99	4.188	1	4103.36	0.000428
67	101325	27332	979.34	280.46	66.99	4.188	1	4101.54	0.000422
68	101325	28561	978.78	284.65	67.99	4.189	1	4099.71	0.000416
69	101325	29837	978.21	288.84	68.99	4.189	1.001	4097.88	0.00041
70	101325	31161	977.63	293.03	69.99	4.19	1.001	4096.03	0.000404
71	101325	32533	977.05	297.22	70.99	4.19	1.001	4094.18	0.000399
72	101325	33957	976.47	301.41	71.99	4.191	1.001	4092.31	0.000394
73	101325	35433	975.88	305.6	72.99	4.192	1.001	4090.45	0.000388
74	101325	36963	975.28	309.79	73.99	4.192	1.001	4088.57	0.000383
75	101325	38548	974.68	313.99	74.99	4.193	1.001	4086.69	0.000378
76	101325	40190	974.08	318.18	76	4.194	1.002	4084.8	0.000373
77	101325	41890	973.46	322.37	77	4.194	1.002	4082.91	0.000369
78	101325	43650	972.85	326.57	78	4.195	1.002	4081.01	0.000364
79	101325	45473	972.23	330.76	79	4.196	1.002	4079.11	0.000359
80	101325	47359	971.6	334.96	80	4.196	1.002	4077.2	0.000355
81	101325	49310	970.97	339.16	81.01	4.197	1.002	4075.29	0.000351
82	101325	51328	970.33	343.35	82.01	4.198	1.003	4073.38	0.000346
83	101325	53415	969.69	347.55	83.01	4.199	1.003	4071.46	0.000342
84	101325	55572	969.04	351.75	84.01	4.2	1.003	4069.54	0.000338

85	101325	57803	968.39	355.95	85.02	4.2	1,003	4067.62	0.000334
86	101325	60107	967.73	360.15	86.02	4.201	1,003	4065.7	0.00033
87	101325	62488	967.07	364.35	87.02	4.202	1,004	4063.78	0.000326
88	101325	64947	966.41	368.56	88.03	4.203	1,004	4061.85	0.000322
89	101325	67486	965.74	372.76	89.03	4.204	1,004	4059.93	0.000319
90	101325	70108	965.06	376.96	90.04	4.205	1,004	4058	0.000315
91	101325	72814	964.38	381.17	91.04	4.206	1,005	4056.08	0.000311
92	101325	75607	963.7	385.38	92.05	4.207	1,005	4054.15	0.000308
93	101325	78488	963.01	389.58	93.05	4.208	1,005	4052.23	0.000304
94	101325	81460	962.31	393.79	94.06	4.209	1,005	4050.31	0.000301
95	101325	84525	961.62	398	95.06	4.21	1,006	4048.39	0.000298
96	101325	87685	960.91	402.21	96.07	4.211	1,006	4046.47	0.000295
97	101325	90943	960.2	406.42	97.07	4.212	1,006	4044.55	0.000291
98	101325	94301	959.49	410.64	98.08	4.213	1,006	4042.64	0.000288
99	101325	97760	958.78	414.85	99.09	4.214	1,007	4040.73	0.000285
100	101325	101325	958.05	419.06	100.09	4.216	1,007	4038.82	0.000282
			<a href="http://www.thermexcel.com/english/tables/cau_atm.htm">http://www.thermexcel.com/english/tables/cau_atm.htm</a>						



## ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ

Density of Water (g/cm <sup>3</sup> ) at Temperatures from 0°C (liquid state) to 30.9°C by 0.1°C inc.										
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0.999841	0.999847	0.999854	0.99986	0.999866	0.999872	0.999878	0.999884	0.999889	0.999895
1	0.9999	0.999905	0.999909	0.999914	0.999918	0.999923	0.999927	0.99993	0.999934	0.999938
2	0.999941	0.999944	0.999947	0.99995	0.999953	0.999955	0.999958	0.99996	0.999962	0.999964
3	0.999965	0.999967	0.999968	0.999969	0.99997	0.999971	0.999972	0.999972	0.999973	0.999973
4	0.999973	0.999973	0.999973	0.999972	0.999972	0.999972	0.99997	0.999969	0.999968	0.999966
5	0.999965	0.999963	0.999961	0.999959	0.999957	0.999955	0.999952	0.99995	0.999947	0.999944
6	0.999941	0.999938	0.999935	0.999931	0.999927	0.999924	0.99992	0.999916	0.999911	0.999907
7	0.999902	0.999898	0.999893	0.999888	0.999883	0.999877	0.999872	0.999866	0.999861	0.999855
8	0.999849	0.999843	0.999837	0.99983	0.999824	0.999817	0.99981	0.999803	0.999796	0.999789
9	0.999781	0.999774	0.999766	0.999758	0.999751	0.999742	0.999734	0.999726	0.999717	0.999709
10	0.9997	0.999691	0.999682	0.999673	0.999664	0.999654	0.999645	0.999635	0.999625	0.999615
11	0.999605	0.999595	0.999585	0.999574	0.999564	0.999553	0.999542	0.999531	0.99952	0.999509
12	0.999498	0.999486	0.999475	0.999463	0.999451	0.999439	0.999427	0.999415	0.999402	0.99939
13	0.999377	0.999364	0.999352	0.999339	0.999326	0.999312	0.999299	0.999285	0.999272	0.999258
14	0.999244	0.99923	0.999216	0.999202	0.999188	0.999173	0.999159	0.999144	0.999129	0.999114
15	0.999099	0.999084	0.999069	0.999054	0.999038	0.999023	0.999007	0.998991	0.998975	0.998959
16	0.998943	0.998926	0.99891	0.998893	0.998877	0.99886	0.998843	0.998826	0.998809	0.998792
17	0.998774	0.998757	0.998739	0.998722	0.998704	0.998686	0.998668	0.99865	0.998632	0.998613
18	0.998595	0.998576	0.998558	0.998539	0.99852	0.998501	0.998482	0.998463	0.998444	0.998424
19	0.998405	0.998385	0.998365	0.998345	0.998325	0.998305	0.998285	0.998265	0.998244	0.998224
20	0.998203	0.998183	0.998162	0.998141	0.99812	0.998099	0.998078	0.998056	0.998035	0.998013
21	0.997992	0.99797	0.997948	0.997926	0.997904	0.997882	0.99786	0.997837	0.997815	0.997792
22	0.99777	0.997747	0.997724	0.997701	0.997678	0.997655	0.997632	0.997608	0.997585	0.997561
23	0.997538	0.997514	0.99749	0.997466	0.997442	0.997418	0.997394	0.997369	0.997345	0.99732
24	0.997296	0.997271	0.997246	0.997221	0.997196	0.997171	0.997146	0.99712	0.997095	0.997069
25	0.997044	0.997018	0.996992	0.996967	0.996941	0.996914	0.996888	0.996862	0.996836	0.996809
26	0.996783	0.996756	0.996729	0.996703	0.996676	0.996649	0.996621	0.996594	0.996567	0.99654
27	0.996512	0.996485	0.996457	0.996429	0.996401	0.996373	0.996345	0.996317	0.996289	0.996261
28	0.996232	0.996204	0.996175	0.996147	0.996118	0.996089	0.99606	0.996031	0.996002	0.995973
29	0.995944	0.995914	0.995885	0.995855	0.995826	0.995796	0.995766	0.995736	0.995706	0.995676
30	0.995646	0.995616	0.995586	0.995555	0.995525	0.995494	0.995464	0.995433	0.995402	0.995371
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
						<a href="http://www.simetric.co.uk/si_water.htm">http://www.simetric.co.uk/si_water.htm</a>				

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΙΞΩΔΕΣ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ ΓΛΥΚΕΡΙΝΗΣ

Viscosity of Aqueous Glycerine Solutions  
in Centipoises/mPa s

Glycerine percent weight	Temperature (°C)										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0 <sup>1)</sup>	1.792	1.308	1.005	0.8007	0.6560	0.5494	0.4688	0.4061	0.3565	0.3165	0.2838
10	2.44	1.74	1.31	1.03	0.826	0.680	0.575	0.500	-	-	-
20	3.44	2.41	1.76	1.35	1.07	0.879	0.731	0.635	-	-	-
30	5.14	3.49	2.50	1.87	1.46	1.16	0.956	0.816	0.690	-	-
40	8.25	5.37	3.72	2.72	2.07	1.62	1.30	1.09	0.918	0.763	0.668
50	14.6	9.01	6.00	4.21	3.10	2.37	1.86	1.53	1.25	1.05	0.910
60	29.9	17.4	10.8	7.19	5.08	3.76	2.85	2.29	1.84	1.52	1.28
65	45.7	25.3	15.2	9.85	6.80	4.89	3.66	2.91	2.28	1.86	1.55
67	55.5	29.9	17.7	11.3	7.73	5.50	4.09	3.23	2.50	2.03	1.68
70	76	38.8	22.5	14.1	9.40	6.61	4.86	3.78	2.90	2.34	1.93
75	132	65.2	35.5	21.2	13.6	9.25	6.61	5.01	3.80	3.00	2.43
80	255	116	60.1	33.9	20.8	13.6	9.42	6.94	5.13	4.03	3.18
85	540	223	109	58	33.5	21.2	14.2	10.0	7.28	5.52	4.24
90	1310	498	219	109	60.0	35.5	22.5	15.5	11.0	7.93	6.00
91	1590	592	259	127	68.1	39.8	25.1	17.1	11.9	8.62	6.40
92	1950	729	310	147	78.3	44.8	28.0	19.0	13.1	9.46	6.82
93	2400	860	367	172	89	51.5	31.6	21.2	14.4	10.3	7.54
94	2930	1040	437	202	105	58.4	35.4	23.6	15.8	11.2	8.19
95	3690	1270	523	237	121	67.0	39.9	26.4	17.5	12.4	9.08
96	4600	1580	624	281	142	77.8	45.4	29.7	19.6	13.6	10.1
97	5770	1950	765	340	166	88.9	51.9	33.6	21.9	15.1	10.9
98	7370	2460	939	409	196	104	59.8	38.5	24.8	17.0	12.2
99	9420	3090	1150	500	235	122	69.1	43.6	27.8	19.0	13.3
100	12070	3900	1410	612	284	142	81.3	50.6	31.9	21.3	14.8

<sup>1)</sup>Viscosity of water taken from "Properties of Ordinary Water-Substance," N.E. Dorsey, p. 184, New York (1940)

<http://www.dow.com/glycerine/resources/viscosity.htm>

## ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ ΓΛΥΚΕΡΙΝΗΣ

**Density of Glycerine-Water Solutions**

Glycerine (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )					Glycerine (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )				
	15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C		15°C	15.5°C	20°C	25°C	30°C
100	1.26415	1.26381	1.26308	1.25802	1.25495	50	1.12870	1.12845	1.12680	1.12375	1.12110
99	1.26160	1.26125	1.25850	1.25545	1.25235	49	1.12800	1.12575	1.12260	1.12110	1.11845
98	1.25900	1.25865	1.25590	1.25290	1.24975	48	1.12325	1.12305	1.12000	1.11840	1.11580
97	1.25645	1.25610	1.25335	1.25030	1.24710	47	1.12055	1.12030	1.11820	1.11575	1.11320
96	1.25385	1.25350	1.25080	1.24770	1.24450	46	1.11780	1.11760	1.11550	1.11310	1.11055
95	1.25130	1.25095	1.24825	1.24515	1.24190	45	1.11510	1.11490	1.11280	1.11040	1.10785
94	1.24865	1.24830	1.24560	1.24250	1.23930	44	1.11235	1.11215	1.11010	1.10775	1.10530
93	1.24600	1.24565	1.24300	1.23985	1.23670	43	1.10960	1.10945	1.10740	1.10510	1.10265
92	1.24340	1.24305	1.24035	1.23725	1.23410	42	1.10690	1.10670	1.10470	1.10240	1.10005
91	1.24075	1.24040	1.23770	1.23460	1.23150	41	1.10415	1.10400	1.10200	1.09975	1.09740
90	1.23810	1.23775	1.23510	1.23200	1.22890	40	1.10145	1.10130	1.09930	1.09710	1.09475
89	1.23545	1.23510	1.23245	1.22935	1.22625	39	1.09875	1.09860	1.09665	1.09445	1.09215
88	1.23280	1.23245	1.22975	1.22665	1.22360	38	1.09605	1.09590	1.09400	1.09180	1.08955
87	1.23015	1.22980	1.22710	1.22400	1.22095	37	1.09340	1.09320	1.09135	1.08915	1.08690
86	1.22750	1.22710	1.22445	1.22135	1.21830	36	1.09070	1.09050	1.08865	1.08655	1.08430
85	1.22485	1.22445	1.22180	1.21870	1.21565	35	1.08800	1.08780	1.08600	1.08390	1.08165
84	1.22220	1.22180	1.21915	1.21605	1.21300	34	1.08530	1.08515	1.08335	1.08125	1.07905
83	1.21955	1.21915	1.21650	1.21340	1.21035	33	1.08265	1.08245	1.08070	1.07860	1.07645
82	1.21690	1.21650	1.21380	1.21075	1.20770	32	1.07995	1.07975	1.07800	1.07600	1.07380
81	1.21425	1.21385	1.21115	1.20810	1.20505	31	1.07725	1.07705	1.07535	1.07335	1.07120
80	1.21160	1.21120	1.20850	1.20545	1.20240	30	1.07455	1.07435	1.07270	1.07070	1.06855
79	1.20895	1.20845	1.20575	1.20275	1.19970	29	1.07195	1.07175	1.07010	1.06815	1.06605
78	1.20630	1.20570	1.20305	1.20005	1.19705	28	1.06935	1.06915	1.06755	1.06560	1.06355
77	1.20365	1.20305	1.20030	1.19735	1.19435	27	1.06670	1.06655	1.06495	1.06305	1.06105
76	1.20100	1.20025	1.19760	1.19465	1.19170	26	1.06410	1.06390	1.06240	1.06055	1.05865
75	1.19785	1.19750	1.19485	1.19185	1.18890	25	1.06150	1.06130	1.05980	1.05800	1.05605
74	1.19510	1.19480	1.19215	1.18925	1.18635	24	1.05885	1.05870	1.05720	1.05545	1.05350
73	1.19235	1.19205	1.18940	1.18650	1.18365	23	1.05625	1.05610	1.05465	1.05290	1.05100
72	1.18965	1.18930	1.18670	1.18380	1.18100	22	1.05365	1.05350	1.05205	1.05035	1.04850
71	1.18690	1.18655	1.18395	1.18110	1.17830	21	1.05100	1.05090	1.04950	1.04780	1.04600
70	1.18415	1.18385	1.18125	1.17840	1.17565	20	1.04840	1.04825	1.04690	1.04525	1.04350
69	1.18135	1.18105	1.17850	1.17565	1.17290	19	1.04580	1.04575	1.04440	1.04280	1.04105
68	1.17860	1.17830	1.17575	1.17295	1.17020	18	1.04325	1.04325	1.04195	1.04035	1.03860
67	1.17585	1.17555	1.17300	1.17020	1.16745	17	1.04065	1.04075	1.03945	1.03790	1.03615
66	1.17305	1.17275	1.17025	1.16745	1.16470	16	1.03805	1.03825	1.03695	1.03545	1.03370
65	1.17030	1.17000	1.16750	1.16475	1.16195	15	1.03540	1.03570	1.03450	1.03300	1.03130
64	1.16755	1.16725	1.16475	1.16200	1.15925	14	1.03280	1.03320	1.03200	1.03055	1.02885
63	1.16480	1.16445	1.16205	1.15925	1.15650	13	1.03020	1.03070	1.02955	1.02805	1.02640
62	1.16200	1.16170	1.15930	1.15655	1.15375	12	1.02760	1.02820	1.02705	1.02560	1.02395
61	1.15925	1.15895	1.15655	1.15380	1.15100	11	1.02505	1.02565	1.02455	1.02315	1.02150
60	1.15650	1.15615	1.15380	1.15105	1.14830	10	1.02245	1.02315	1.02210	1.02070	1.01905
59	1.15370	1.15340	1.15105	1.14835	1.14555	9	1.02085	1.02075	1.01970	1.01835	1.01670
58	1.15095	1.15065	1.14830	1.14560	1.14285	8	1.01820	1.01835	1.01730	1.01600	1.01440
57	1.14815	1.14785	1.14555	1.14285	1.14010	7	1.01660	1.01590	1.01495	1.01360	1.01205
56	1.14535	1.14510	1.14280	1.14015	1.13740	6	1.01395	1.01350	1.01255	1.01125	1.00970
55	1.14260	1.14230	1.14005	1.13740	1.13470	5	1.01120	1.01110	1.01015	1.00890	1.00735
54	1.13980	1.13955	1.13730	1.13465	1.13195	4	1.00855	1.00870	1.00780	1.00655	1.00505
53	1.13705	1.13680	1.13455	1.13195	1.12925	3	1.00695	1.00690	1.00640	1.00415	1.00270
52	1.13425	1.13400	1.13180	1.12920	1.12650	2	1.00395	1.00385	1.00300	1.00180	1.00035
51	1.13150	1.13125	1.12905	1.12650	1.12380	1	1.00135	1.00145	1.00060	0.99945	0.99800
						0	0.99913	0.99905	0.99823	0.99708	0.99668

## ΠΙΝΑΚΑΣ 5. ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΙΣΧΛΟΥΣ

A Dynamic or Absolute Viscosity Units Converting Table

Convert from	Multiply by				
	Poiseuille (Pa s)	Poise (dyne s/cm <sup>2</sup> ) (g/cm s)	centiPoise	kg/m h	kg s/m <sup>2</sup>
Poiseuille (Pa s)	1	10	103	3.63 10 <sup>3</sup>	0.102
Poise (dyne s/cm <sup>2</sup> ) (g/cm s)	0.1	1	100	360	0.0102
centiPoise	0.001	0.01	1	3.6	0.00012
kg/m h	2.78 10 <sup>-4</sup>	0.00278	0.0278	1	2.83 10 <sup>-5</sup>
kg s/m <sup>2</sup>	9.81	98.1	9.81 10 <sup>3</sup>	3.53 10 <sup>4</sup>	1
lb <sub>t</sub> s/inch <sup>2</sup>	6.89 10 <sup>3</sup>	6.89 10 <sup>4</sup>	6.89 10 <sup>6</sup>	2.48 10 <sup>7</sup>	703
lb <sub>t</sub> s/ft <sup>2</sup>	47.9	479	4.79 10 <sup>4</sup>	1.72 10 <sup>5</sup>	0.0488
lb <sub>t</sub> h/ft <sup>2</sup>	1.72 10 <sup>5</sup>	1.72 10 <sup>6</sup>	1.72 10 <sup>8</sup>	6.21 10 <sup>6</sup>	1.76 10 <sup>4</sup>
lb/ft s	1.49	14.9	1.49 10 <sup>3</sup>	5.36 10 <sup>3</sup>	0.152
lb/ft h	4.13 10 <sup>-4</sup>	0.00413	0.413	1.49	4.22 10 <sup>-5</sup>

[http://www.engineeringtoolbox.com/dynamic-viscosity-d\\_571.html](http://www.engineeringtoolbox.com/dynamic-viscosity-d_571.html)

ΠΙΝΑΚΑΣ 6. ΔΕΙΚΤΗΣ ΔΙΑΘΛΑΣΗΣ ΔΙΑΛΥΜΑΤΩΝ ΓΛΥΚΕΡΙΝΗΣ

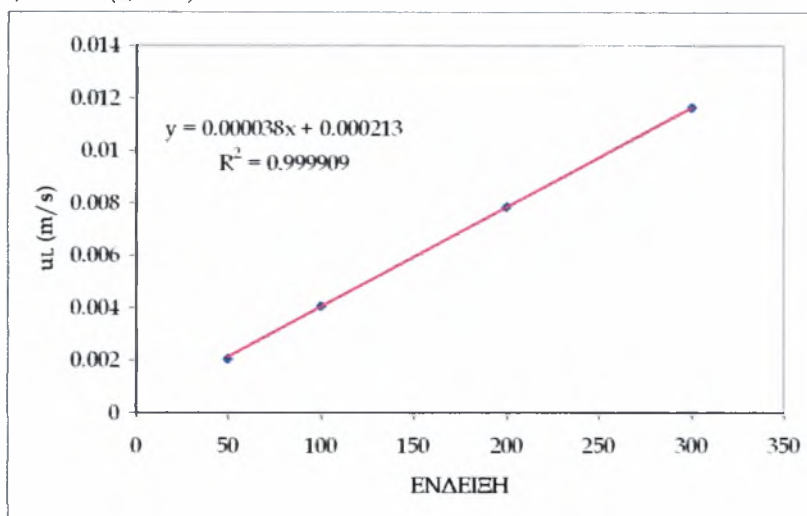
Refractive Index of Glycerine-Water Solutions at 20° C (69° F)

Glycerine % by Weight	Refractive Index $n_D^{20}$	Difference for 1%	Glycerine % by Weight	Refractive Index $n_D^{20}$	Difference for 1%
100	1.47399	0.00165	50	1.39809	0.00149
99	1.47234	0.00163	49	1.39660	0.00147
98	1.47071	0.00161	48	1.39513	0.00145
97	1.46909	0.00157	47	1.39368	0.00141
96	1.46752	0.00156	46	1.39227	0.00138
95	1.46597	0.00154	45	1.39089	0.00136
94	1.46443	0.00153	44	1.38953	0.00135
93	1.46290	0.00151	43	1.38818	0.00135
92	1.46139	0.00150	42	1.38683	0.00135
91	1.45989	0.00150	41	1.38548	0.00135
90	1.45839	0.00150	40	1.38413	0.00135
89	1.45689	0.00150	39	1.38278	0.00135
88	1.45539	0.00150	38	1.38143	0.00135
87	1.45389	0.00152	37	1.38008	0.00134
86	1.45237	0.00152	36	1.37874	0.00134
85	1.45085	0.00155	35	1.37740	0.00134
84	1.44930	0.00156	34	1.37606	0.00134
83	1.44770	0.00160	33	1.37472	0.00134
82	1.44612	0.00162	32	1.37338	0.00134
81	1.44450	0.00160	31	1.37204	0.00134
80	1.44290	0.00155	30	1.37070	0.00134
79	1.44135	0.00153	29	1.36936	0.00134
78	1.43982	0.00150	28	1.36802	0.00133
77	1.43832	0.00149	27	1.36669	0.00133
76	1.43683	0.00149	26	1.36536	0.00132
75	1.43534	0.00149	25	1.36404	0.00132
74	1.43385	0.00149	24	1.36272	0.00131
73	1.43236	0.00149	23	1.36141	0.00131
72	1.43087	0.00149	22	1.36010	0.00131
71	1.42938	0.00149	21	1.35879	0.00130
70	1.42789	0.00149	20	1.35749	0.00130
69	1.42640	0.00149	19	1.35619	0.00129
68	1.42491	0.00149	18	1.35490	0.00129
67	1.42342	0.00149	17	1.35361	0.00128
66	1.42193	0.00149	16	1.35233	0.00127
65	1.42044	0.00149	15	1.35106	0.00126
64	1.41895	0.00149	14	1.34980	0.00126
63	1.41746	0.00149	13	1.34854	0.00125
62	1.41597	0.00149	12	1.34729	0.00125
61	1.41448	0.00149	11	1.34604	0.00123
60	1.41299	0.00149	10	1.34481	0.00122
59	1.41150	0.00149	9	1.34359	0.00121
58	1.41001	0.00149	8	1.34238	0.00120
57	1.40852	0.00149	7	1.34118	0.00119
56	1.40703	0.00149	6	1.33999	0.00119
55	1.40554	0.00149	5	1.33880	0.00118
54	1.40405	0.00149	4	1.33762	0.00117
53	1.40256	0.00149	3	1.33645	0.00115
52	1.40107	0.00149	2	1.33530	0.00114
51	1.39958	0.00149	1	1.33416	0.00113
			0	1.33303	-

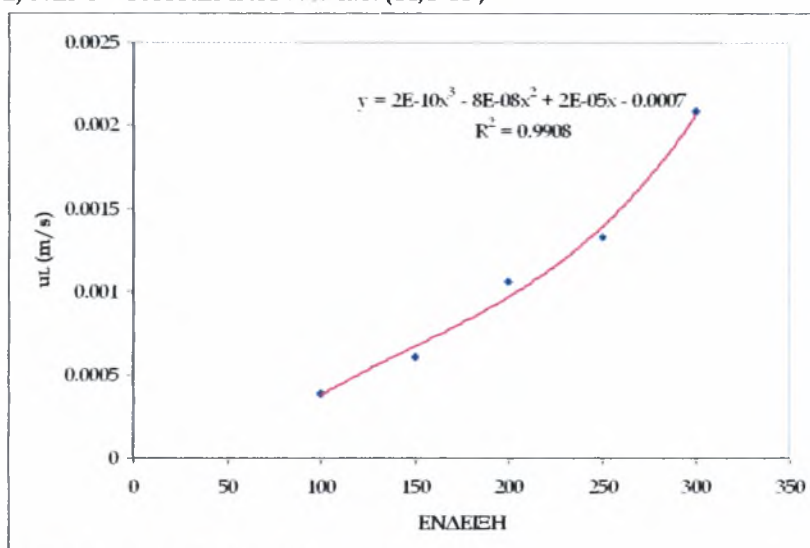
[http://www.dow.com/glycerine/resources/table12\\_020.htm](http://www.dow.com/glycerine/resources/table12_020.htm)

## ΣΧΗΜΑ Π1. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΡΟΟΜΕΤΡΟΥ (1) ΥΓΡΗΣ ΦΑΣΗΣ.

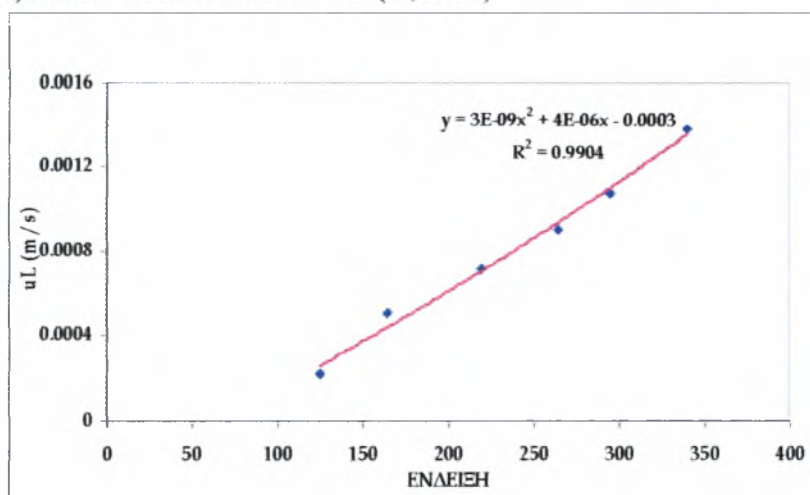
### 1) ΝΕΡΟ (1,0 CP)



### 2) ΝΕΡΟ - ΓΛΥΚΕΡΙΝΗ 60% κ.ο. (14,1 CP)

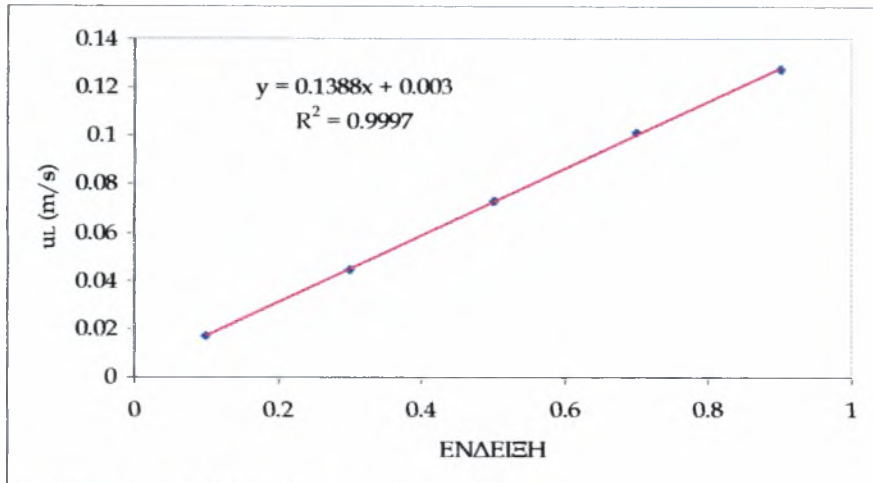


### 3) ΝΕΡΟ - ΓΛΥΚΕΡΙΝΗ 74% κ.ο. (46,41 CP)

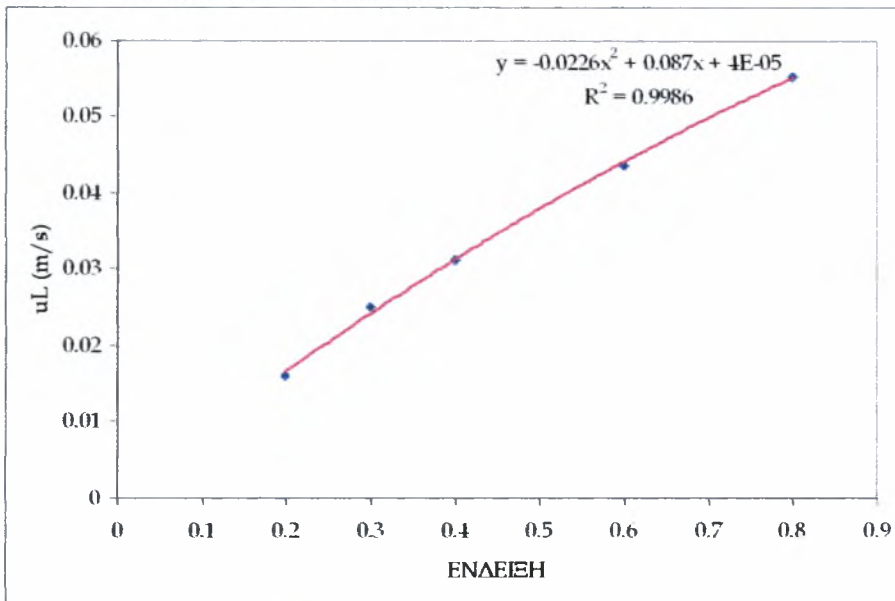


## ΣΧΗΜΑ Π2. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΡΟΟΜΕΤΡΟΥ (2) ΥΓΡΗΣ ΦΑΣΗΣ.

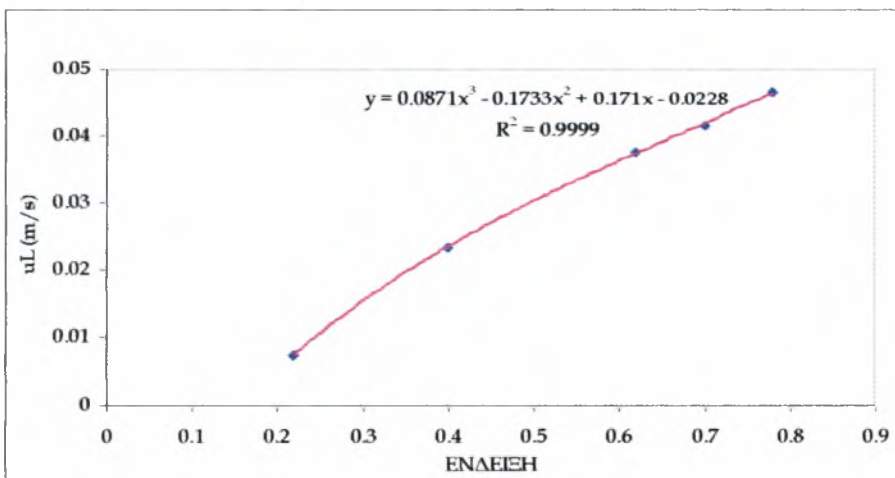
### 1) ΝΕΡΟ (1,0 CP)



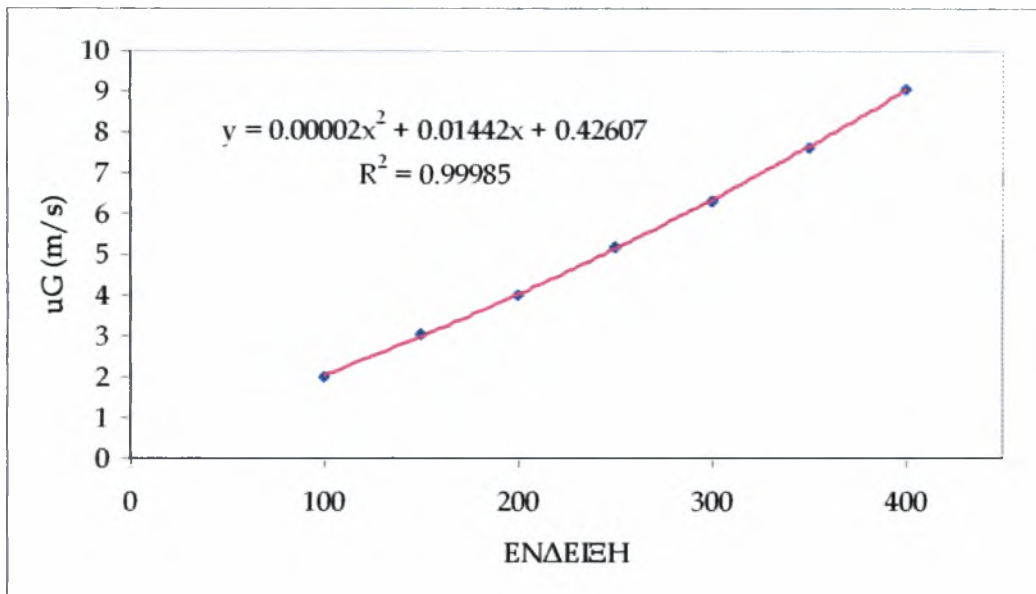
### 2) ΝΕΡΟ - ΓΛΥΚΕΡΙΝΗ 60% κ.ο. (14,1 CP)



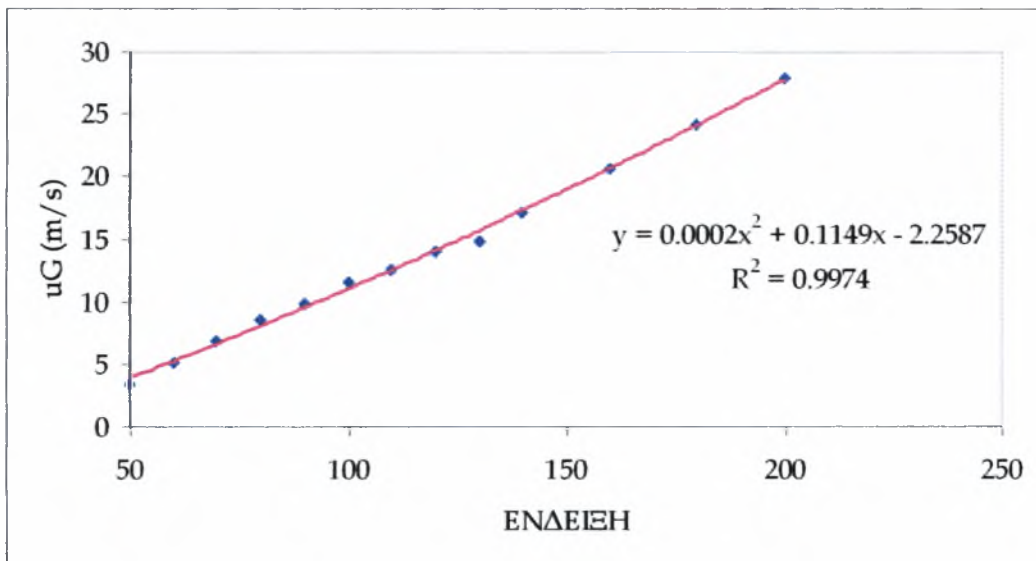
### 3) ΝΕΡΟ - ΓΛΥΚΕΡΙΝΗ 74% κ.ο. (46,41 CP)



**ΣΧΗΜΑ Π3. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΡΟΟΜΕΤΡΟΥ (1) ΑΕΡΙΑΣ ΦΑΣΗΣ.**

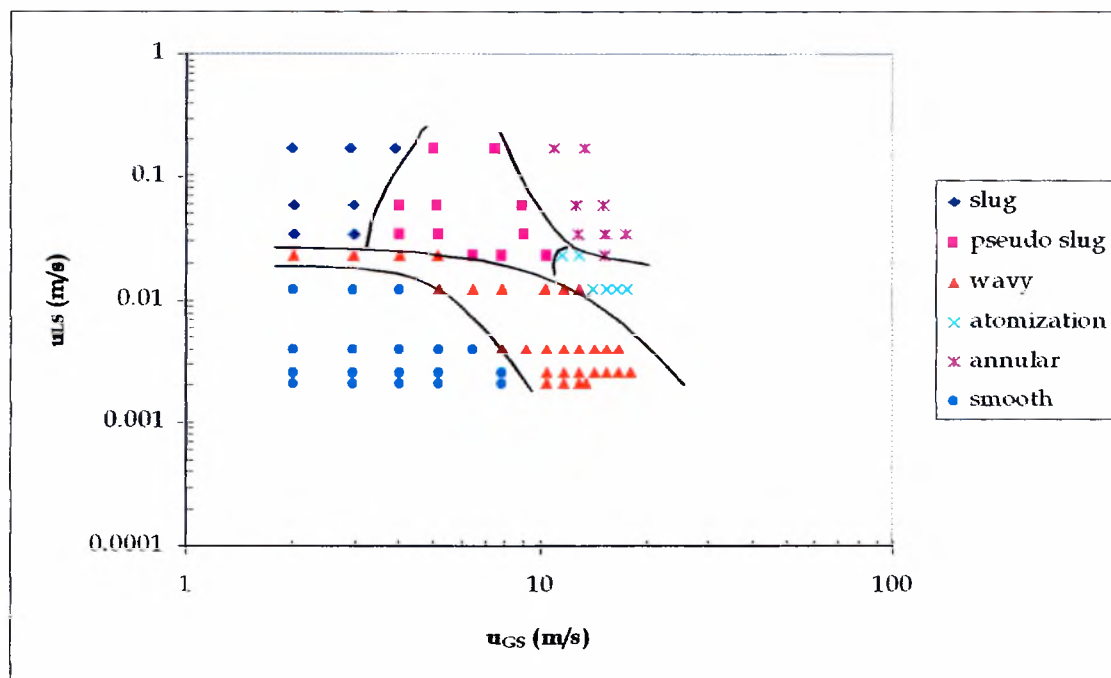


**ΣΧΗΜΑ Π4. ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΡΟΟΜΕΤΡΟΥ (2) ΑΕΡΙΑΣ ΦΑΣΗΣ.**





**ΣΧΗΜΑ Π5. ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΘΕΣΤΩΤΩΝ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΝΕΡΟΥ - ΑΕΡΑ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟ ΑΓΩΓΟ.**



ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	
ΤΙΤΛΟΣ	
ΛΗΞΗ	ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΔΑΝΕΙΖΟΜΕΝΟΥ
27/06/11	

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ**  
 Τηλ.: 24210 06300-2

